

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e
da Água



Dissertação

Incorporação de lodos de estações de tratamento de água: efeitos sobre
atributos do solo e desempenho agrônômico de cultivos anuais

Pablo Lacerda Ribeiro

Pelotas, 2020

Pablo Lacerda Ribeiro

Incorporação de lodos de estações de tratamento de água: efeitos sobre atributos do solo e desempenho agronômico de cultivos anuais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências

Orientadora: Professora Dra. Cláudia Liane Rodrigues de Lima
Coorientador: Pesquisador Dr. Adilson Luís Bamberg
Coorientador: Pós-doutorando Dr. Ivan dos Santos Pereira

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

R484i Ribeiro, Pablo Lacerda

Incorporação de lodos de estações de tratamento de água: efeitos sobre atributos do solo e desempenho agrônômico de cultivos anuais / Pablo Lacerda Ribeiro ; Cláudia Liane Rodrigues de Lima, orientadora ; Adilson Luís Bamberg, Ivan dos Santos Pereira, coorientadores. — Pelotas, 2020.

75 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Solos arenosos - Incorporação de resíduos. 2. Condicionadores de solo. 3. Lodos de alumínio. I. Lima, Cláudia Liane Rodrigues de, orient. II. Bamberg, Adilson Luís, coorient. III. Pereira, Ivan dos Santos, coorient. IV. Título.

CDD : 631.4

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

Pablo Lacerda Ribeiro

Incorporação de lodos de estações de tratamento de água: efeitos sobre atributos do solo e desempenho agronômico de cultivos anuais

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 26 de agosto de 2020.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Cláudia Liane Rodrigues de Lima (Orientadora)
Doutora em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo, USP.

Pesq. Dr. Clenio Nailto Pillon
Doutor em Ciência do solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

Prof. Dr. Filipe Selau Carlos
Doutor em Ciência do solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

Prof. Dr. Marcelo Peske Hartwig
Doutor em Irrigação e Drenagem pela Universidade de São Paulo, USP.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à minha família e à minha esposa por todo o apoio durante minha formação pessoal, profissional e acadêmica. Sou grato aos meus orientadores no projeto de mestrado, Dra. Cláudia Liane Rodrigues de Lima, Dr. Adilson Luís Bamberg e Dr. Ivan dos Santos Pereira pela parceria, paciência, apoio, ensinamentos e amizade.

Este projeto também não poderia ter sido concluído sem o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) associado à disponibilização da estrutura da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) e Embrapa Clima Temperado.

Agradeço aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, aos demais professores da UFPEL e pesquisadores da Embrapa os quais contribuíram para a minha formação acadêmica, assim como toda a equipe técnica das duas instituições que participaram e tornaram possível a execução desse projeto.

Muitas pessoas da UFPEL e da Embrapa participaram, auxiliaram e tornaram a execução desse projeto algo possível, produtivo e prazeroso de ser realizado. Não tenho a ousadia de citar nomes, mas sou grato a todos e, se um dia o destino permitir, retribuirei de alguma forma.

Resumo

RIBEIRO, Pablo Lacerda. **Incorporação de lodos de estações de tratamento de água: efeitos sobre atributos do solo e desempenho agrônômico de cultivos anuais**. 2020. 75f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

Lodos de estações de tratamento de água (LETAs) são resíduos gerados em grandes quantidades durante o processo de purificação desse recurso natural para consumo humano. Nesse sentido, diversas alternativas de destinação final dos LETAs vêm sendo propostas, incluindo o uso agrícola. Entretanto, ao considerar a aplicação de LETAs em solos cultivados, é essencial definir a dose e a estratégia de preparação mais adequada assim como a possibilidade de combinação com outros materiais como lodos de estação de tratamento de esgotos (LETEs) com o intuito de proporcionar benefícios às plantas cultivadas. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou verificar a influência de doses crescentes de LETA com pH corrigido e incorporado no solo sobre o desempenho agrônômico de milho e azevém, sobre os atributos físico-hídricos do solo, sobre a composição nutricional e acúmulo de contaminantes inorgânicos no solo e no tecido vegetal das plantas, determinando o potencial de uso de LETAs com pH corrigido como condicionador de solo, assim como comparar a incorporação no solo de LETA com pH corrigido com outras duas formas de preparo do LETA e com a combinação LETA e LETE, sendo todos balizados pela dose de 30 ton ha⁻¹. O experimento foi conduzido na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, sendo implantado em condições de campo em um delineamento experimental de blocos casualizados com quatro repetições e possuindo os seguintes tratamentos: Doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹ de massa seca) de LETA solarizado moído e com pH corrigido, além de quatro tratamentos adicionais com LETA solarizado moído e sem correção do pH (30 ton ha⁻¹); LETA não solarizado com o pH corrigido (30 ton ha⁻¹); condicionador de solo comercial MecPlant a base de casca de pinus bioestabilizada (30 ton ha⁻¹) e mistura de LETA solarizado e moído com pH corrigido, com lodo de estação de tratamento de esgoto solarizado e moído (30 ton ha⁻¹) na proporção de 75:25 (LA:LE), respectivamente. Concluiu-se que: as doses crescentes de LETA não têm efeito sobre as variáveis agrônômicas, enquanto que o tratamento LA:LE aumenta a altura e a massa seca das plantas cultivadas; as doses crescentes de LETA não afetam os atributos relacionados à fertilidade do solo, não diminuindo o teor de fósforo disponível e não aumentando a porcentagem da CTC ocupada por alumínio; o tratamento LA:LE aumenta os teores de P, Cu e Zn e, conseqüentemente, incrementa a concentração desses elementos no tecido vegetal; as doses crescentes de LETAs até o máximo de 60 ton ha⁻¹, assim como a combinação de LETA com LETE, não interferem nos teores de metais pesados do solo e no tecido vegetal de plantas de azevém; as variáveis físico-hídricas do solo não são influenciadas pelas doses crescentes de LETAs testadas; os LETAs com pH corrigido, sem correção do pH e o LETA não solarizado e não moído, assim como a mistura LA:LE, não modificam as variáveis físicas do solo analisadas.

Palavras-chave: Lodos de alumínio. Condicionadores de solo. Incorporação de resíduos no solo. Solos arenosos.

Abstract

RIBEIRO, Pablo Lacerda. **Incorporation of water treatment residuals: Effects on soil attributes and on agronomic development of annual crops**. 2020. 75 f. Dissertation (Master degree) - Postgraduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Federal University of Pelotas, Pelotas - Brazil.

Water treatment residuals (WTRs) are generated in large quantities during the water purification process for human consumption. On this way, many alternatives of WTRs final destination have been proposed such as agricultural use. However, regarding the WTRs application in cultivated soils, it is essential to set the dose and the most suitable strategy of preparation as well as the possibility of combination with other materials as sewage sludge (SS) in order to provide benefits for crops. In this context, the present study aimed to verify the influence of increasing doses of WTRs with corrected pH and soil incorporated on the development of maize and ryegrass, on physical-hydric soil attributes, on nutritional composition and accumulation of inorganic contaminants in soil and in plant tissue, determining the potential use of WTRs pH corrected as soil amendments, as well as to compare the soil incorporation of WTRs with corrected pH with others ways of preparing WTRs and with the combination of WTR and SS, being these treatments set out by the dose of 30 tons ha⁻¹. The experiment was carried out at the “Estação Experimental Terras Baixas” of “Embrapa Clima Temperado”, being installed in field conditions in a randomized blocks design with four replicates and with the following treatments: Increasing doses (0, 15, 30 e 60 tons ha⁻¹ dry mass) of solarized and ground WTRs with corrected pH, in addition to four treatments with solarized and ground WTR with non-corrected pH (30 tons ha⁻¹); non-solarized WTR with corrected pH (30 tons ha⁻¹); commercial soil amendment MecPlant based on bio-stabilized pine bark (30 tons ha⁻¹) and mix of solarized and ground WTR with corrected pH, with solarized and ground sewage sludge (30 tons ha⁻¹) in proportion of 75:25 of dry mass (LA:LE), respectively. It was concluded that: the increasing doses of WTR do not affect the agronomic variables, while the treatment LA:LE increases the height and dry mass of cultivated plants; the WTR increasing doses do not change the attributes related to soil fertility, not decreasing the available phosphorus content and not increasing the percentage of CTC occupied by aluminum; the treatment LA:LE increases the content of P, Cu and Zn and, consequently, increases the content of these elements in plant tissue; the increasing doses of WTRs until the maximum of 60 tons ha⁻¹ as well as the mix of WTR and SS do not interfere on heavy metal content in soil and in tissue of ryegrass; the soil physical-hydric variables are not influenced by increasing doses of WTRs within the tested; the WTRs with corrected pH, without pH correction and the non-solarized and non-ground WTR as well as the mix LA:LE did not modify the analyzed soil physical variables.

Keywords: Alum sludge. Soil amendments. Soil incorporation of residues. Sandy soils.

Lista de Figuras

- Figura 1** – Localização da área experimental (GOOGLE EARTH, 2020). 25
- Figura 2** – a) LC (LETA corrigido) ou LNC (LETA não corrigido) (ambos os tratamentos ficam com visual igual após a correção do pH), b) LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE), c) LUC (LETA úmido corrigido) sendo preparado em betoneira, d) COM (condicionador de solo comercial) disposto no solo antes da incorporação e e) imagem do experimento de campo durante a semeadura do milho. 26
- Figura 3** - Altura das plantas (AP), diâmetro do colmo (DC), massa seca (MS) e índice de clorofila (IC) de plantas de milho e de azevém cultivadas em um Planossolo em resposta a doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido. 30
- Figura 4** - Altura das plantas (AP), diâmetro do colmo (DC), massa seca (MS) e índice de clorofila (IC) de milho e de azevém cultivadas em um Planossolo sob aplicação de dose de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras seguidas por letras distintas representam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan (p<0,05)... 31
- Figura 5** – Valores médios de pH_{H2O}, Matéria orgânica (MO), Capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva, Saturação da CTC por bases (V%) e saturação da CTC por Alumínio (m%) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido. 33
- Figura 6** –Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido. 34
- Figura 7** –Ferro (Fe), Manganês (Mn). Cobre (Cu), Zinco (Zn) e Boro (B) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido. 35
- Figura 8** – Valores médios de pH_{H2O}, Matéria orgânica (MO), Capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva, saturação da CTC por bases (V%) e saturação

da CTC por alumínio (m%) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função da aplicação de doses de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras seguidas por letras distintas representam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan (p<0,05)..... 37

Figura 9 – Valores médios de Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função da aplicação de doses de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras seguidas por letras distintas representam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan (p<0,05). 38

Figura 10 – Valores médios de Ferro (Fe), Manganês (Mn), Cobre (Cu), Zinco (Zn) e Boro (B) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função da aplicação de doses de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras seguidas por letras distintas representam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan (p<0,05). 39

Figura 11 – Teores médios de Potássio (K), Fósforo (P), Cálcio (Ca), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Alumínio (Al), Cobre (Cu) e Zinco (Zn) no tecido foliar de plantas de milho e de azevém cultivadas em um Planossolo em resposta a doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido..... 43

Figura 12 – Teores médios de Potássio (K), Fósforo (P), Cálcio (Ca), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Alumínio (Al), Cobre (Cu) e Zinco (Zn) no tecido foliar de plantas de milho e de azevém cultivadas em um Planossolo sob aplicação de dose de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de

materiais ao solo). Barras com cores iguais e seguidas por letras distintas indicam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan ($p < 0,05$). 44

Figura 13 – Teores médios de argila, silte, areia e argila dispersa em água nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m de um Planossolo em resposta a doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido..... 52

Figura 14 – Teores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência à penetração (Rp), água disponível às plantas (AD), umidade volumétrica na capacidade de campo (Θ_{cc}) e umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}) nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m em resposta a doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido em um Planossolo. 55

Figura 15 – Valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência à penetração (Rp), água disponível às plantas (AD), umidade volumétrica na capacidade de campo (Θ_{cc}) e umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}) nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m de um Planossolo sob aplicação de dose de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras com cores iguais e seguidas por letras distintas indicam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan ($p < 0,05$). 58

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características químicas das matérias-primas avaliadas no presente estudo.	27
Tabela 2 – Concentrações médias de Molibdênio (Mo), Mercúrio (Hg), Selênio (Se), Arsênio (As), Cromo (Cr) tri e hexavalente, Chumbo (Pb), Bário (Ba), Níquel (Ni) e Cádmio (Ca) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha ⁻¹) de LETAs com pH corrigido e de 30 ton ha ⁻¹ de condicionador de solo comercial (COM).	41
Tabela 3 - Bário (Ba), Cádmio (Ca), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Níquel (Ni) e Chumbo (Pb) no tecido foliar de plantas de azevém cultivadas em Planossolo sob aplicação de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha ⁻¹) de LETAs com pH corrigido e doses de 30 ton ha ⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial).....	45
Tabela 4 – Teor de argila, silte e areia de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE), e COM (condicionador de solo comercial).....	49
Tabela 5 –Teores médios de argila, silte, areia e argila dispersa em água nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m de um Planossolo sob aplicação de dose de 30 ton ha ⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Letras distintas indicam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan (p<0,05).....	53

Sumário

1. Introdução	11
2. Hipóteses	12
3. Objetivos	13
3.1 Geral	13
3.2. Específicos.....	13
4. Revisão bibliográfica	13
4.1. Tratamento de água e origem de LETAs	13
4.2. LETAs no Brasil e no Mundo	14
4.3. Características químicas, físicas e mineralógicas dos LETAs	15
4.4. Alternativas de uso dos LETAs	15
4.5. Uso agrícola dos LETAs.....	17
4.5.1. Fitotoxicidade do Al e disponibilidade do P em função da incorporação de LETAs	19
4.5.2. Combinação de LETAs com Lodos de Estação de Tratamento de Esgoto	20
4.5.3. LETAs e a agenda da Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável	20
4.6. Legislação sobre aplicação de LETAs no solo	21
5. Capítulo 1 – Desempenho agrônomo de milho e azevém e atributos químicos de um Planossolo sob aplicação de doses de Lodos de Estação de Tratamento de Água	23
5.1. Introdução	23
5.2. Materiais e Métodos	24
5.3. Resultados e discussão	29
5.3.1. Desempenho agrônomo das culturas do milho e do azevém	29
5.3.2. Atributos químicos relacionados à fertilidade do solo	32

5.3.3. Concentração de metais pesado no solo.....	40
5.3.4. Absorção de nutrientes e de metais pesados por plantas de milho e de azevém	41
5.4. Conclusões	45
6. Capítulo 2 – Atributos físico-hídricos sob doses de Lodos de Estação de Tratamento de Água incorporados em um Planossolo	47
6.1. Introdução	47
6.2. Materiais e Métodos	48
6.3. Resultados e discussão	51
6.3.1. Atributos físico-hídricos do solo sob doses crescentes de LETAs com pH corrigido	51
6.3.2. Atributos físico-hídricos do solo sob diferentes estratégias de preparo e de combinação dos LETAs com LETEs	55
6.4. Conclusões	59
7. Considerações finais	60
Referências.....	61

1. Introdução

Estima-se que em 2.050 seremos 9 bilhões de habitantes no planeta (PASTOR et al., 2019), evidenciando a maior necessidade por alimentos e água potável. Recursos básicos, como a água para o consumo humano, demandam uma série de processos para que sejam garantidos os requisitos mínimos de qualidade (KLEEMANN et al., 2020).

A purificação da água envolve a adição de coagulantes, usualmente sulfato de Al ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), e produz grandes quantidades de lodos denominados Lodos de Estação de Tratamento de Água (LETAs) (TAY et al., 2017; TURNER et al., 2019).

Os LETAs, comumente, são dispostos em corpos naturais de água ou em aterros, os quais geram problemas como impactos ambientais negativos e a falta de espaço disponível para destinação, demandando alternativas para sua disposição final (ZHAO et al., 2018).

Normalmente, os LETAs consistem de partículas minerais e materiais orgânicos (IPPOLITO et al., 2011), com características parecidas com as dos solos encontrados na região onde insere-se a Estação de Tratamento de Água (ETA).

Minerais como quartzo, feldspatos, calcita, ilita e esmectita, caulinita, mica, sílica e gibsita são constituintes potenciais dos LETAs (IPPOLITO et al., 2009; PETTERLE et al., 2018), materiais altamente porosos (BABATUNDE et al., 2008) e com partículas com morfologia irregular e variações de tamanho.

Algumas alternativas para a disposição final desses resíduos, como o uso no tratamento de efluentes, em material de construção e aplicação no solo, têm sido apresentadas (BABATUNDE; ZHAO, 2007).

Quando aplicados ao solo, podem melhorar as características físicas como a distribuição de tamanho dos poros, estabilidade de agregados (IBRAHIM et al., 2015) e químicas como o suprimento de nutrientes (HEIL; BARBARICK, 1989; KIM et al., 2002) e mitigação de toxidez por metais pesados (SUDA et al., 2016).

Esses efeitos positivos ainda podem ser potencializados quando os LETAs são combinados com outros materiais orgânicos (IBRAHIM et al., 2015) como Lodos de Estações de Tratamento de Esgoto (LETES), demonstrando ser uma alternativa promissora para a destinação final de resíduos associados ao saneamento básico.

A afinidade dos LETAs pelo P pode diminuir a disponibilidade desse nutriente às plantas (SILVEIRA et al., 2013; LOMBI et al., 2010), constituindo uma das preocupações, considerando a aplicação agrícola desse resíduo.

Fatores como possível toxidez por Al, Fe e Mn e metais pesados também demandam atenção e cautela (WANG et al., 1998; TAY et al., 2017; WASSERMAN et al., 2018), porém raramente ocorrem (ZHAO et al., 2018).

Como o Sulfato de Alumínio é adicionado à água durante o processo de coagulação, existe preocupação de que o LETA gerado pode acumular concentrações elevadas de metais como o Alumínio, ocasionando prejuízo ao crescimento e desenvolvimento das plantas em áreas agrícolas (OLADEJI et al., 2009; SILVEIRA et al., 2013).

No entanto, existem evidências de que esses aumentos podem não ser suficientes para ocasionar fitotoxidez (SILVEIRA et al., 2013). Além disso, se o pH do solo for maior do que 5,5, o Al estará insolúvel, sendo incapaz de causar efeito tóxico aos seres vivos, em especial às plantas.

Embora o uso agrícola dos LETAs venha sendo estudado em nível mundial há mais de 40 anos (BUGBEE; FRINK, 1985), ainda há incertezas em relação ao seu efeito nos atributos de solo e acerca de desempenho agrônômico das culturas devido às diferentes características dos LETAs e às distintas condições experimentais, sobretudo, a dose do LETA e o pH do LETA e do solo. Além disso, há escassez de estudos que indiquem estratégias eficientes e capazes de potencializar os efeitos positivos da aplicação desses resíduos em áreas agrícolas, principalmente, a combinação com LETEs, a qual possibilitaria uma solução conjunta de destinação de resíduos para as empresas de saneamento.

Sendo assim, estudos que apontem os efeitos da aplicação de LETAs e de diferentes estratégias de preparo e combinação dos LETAs com outros materiais em áreas agrícolas são urgentes e necessários para determinar o potencial de uso ou de destinação dos resíduos na agricultura.

2. Hipóteses

Doses adequadas de LETAs, isolados ou combinados com outros materiais, podem ser aplicadas em solos agrícolas, favorecendo às suas características físico-hídricas e químicas e sem riscos à segurança ambiental.

3. Objetivos

3.1 Geral

O estudo tem como objetivo geral avaliar a eficiência agronômica e a segurança ambiental do uso agrícola do LETA, considerando seus efeitos sobre os atributos químicos e físicos do solo, na composição química das plantas e no desempenho de cultivos anuais sob condições de campo.

3.2. Específicos

1 – Determinar atributos físico-hídricos de um Planossolo sob efeito da aplicação de diferentes doses de LETA, com pH corrigido, em condições de campo.

2 – Verificar a influência de doses crescentes de LETA com pH corrigido e incorporado no solo sobre o desempenho agronômico de culturas agrícolas.

3 – Avaliar a influência de doses crescentes de LETA com pH corrigido e incorporado sobre a composição nutricional e acúmulo de contaminantes inorgânicos no solo e em culturas agrícolas.

4 – Avaliar, com base nos atributos químicos e físicos, o potencial de uso de LETAs corrigidos como condicionador de solo.

5 – Comparar a incorporação de LETA com pH corrigido com outras duas formas de preparo do LETA (LETA úmido corrigido e LETA úmido não corrigido) e com a combinação LETA e LETE, todos aplicados no solo na dose de 30 ton ha⁻¹.

4. Revisão bibliográfica

4.1. Tratamento de água e origem de LETAs

Considerando o abastecimento hídrico populacional, a água bruta precisa passar por uma série de processos para remover ou reduzir materiais sólidos em suspensão, elementos químicos e micro-organismos, que podem estar presentes na fonte de captação (LOMBI et al., 2010; TURNER et al., 2019), até ser distribuída e fornecida nos domicílios por companhias de saneamento.

Ainda não há universalização do abastecimento de água à população, pois 83,7% da população brasileira possui acesso à água potável (SNIS, 2018). Por outro lado, em 99,4% dos 5.531 municípios brasileiros há, em pelo menos 1 distrito ou parte dele, abastecimento de água por rede geral de distribuição, enquanto que, a percentagem sobe para 99,7% de 1.185 municípios quando considera-se o Sul do Brasil (Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina) (IBGE, 2010).

O serviço de saneamento e fornecimento de água consiste nas etapas de captação, adução, mistura rápida, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e bombeamento, as quais são, resumidamente, descritas a seguir (CORSAN, 2018): Captação: retirada de água bruta do manancial; Adução: caminho percorrido pela água bruta até a Estação de Tratamento de Água; Mistura rápida: adição de um coagulante para aproximação de partículas e remoção das impurezas; Floculação: onde ocorre a aglutinação das impurezas; Decantação: etapa seguinte, em que os flocos sedimentam no fundo de um tanque; Filtração: retenção dos flocos menores em camadas filtrantes; Desinfecção: adição de cloro para eliminação de microrganismos patogênicos; Fluoretação: adição de compostos de flúor para prevenção de cárie dentária; e Bombeamento: envio de água em condições de consumo para as redes e reservatórios de distribuição.

Após o processo de floculação e decantação, na estação de tratamento de água, é gerado lodo, o qual é um resíduo composto por uma mistura de elementos químicos, areia, silte, argila e substâncias húmicas das águas dos rios (BOTERO et al., 2009), sendo chamado de lodo de estação de tratamento de água (LETA).

4.2. LETAs no Brasil e no Mundo

Existem pelo menos 7.500 estações de tratamento de água no Brasil, as quais utilizam o tratamento convencional desse resíduo. Além disso, o LETA gerado durante tratamento de água bruta é equivalente a 0,2 a 5% do volume total de água que, no Brasil, é de 30.651.850 m³ diários (BOTERO et al., 2009). Baseado nisso, estima-se que a geração diária de LETA no Brasil pode variar entre 61 mil a 1,53 milhões de m³ dia⁻¹.

Zhao et al. (2018) relataram a geração de LETA de alguns países: 328.000, 290.000 e 131.000 ton ano⁻¹ (massa seca) na Holanda, Japão e Reino Unido, respectivamente. O valor alto relatado para a Holanda pode ter sido superestimado em função de incluir outros tipos de resíduos relacionados ao tratamento de água.

Na Austrália, a geração de LETA por diversas empresas de saneamento varia de 150 a 43.000 ton ano⁻¹ em cada uma delas, sendo que o custo típico associado à disposição final do resíduo em aterro ou esgoto é de aproximadamente 130 dólares ton⁻¹ (MAIDEN et al., 2015). Além disso, espera-se que o custo para disposição final de LETA na Irlanda dobre até o final da próxima década, sendo que a geração atual é estimada em 15.000 a 18.000 ton ano⁻¹ de sólidos secos (EVUTI; LAWAL, 2011).

Corrobora-se que a geração de LETAs cresce conforme o aumento populacional e acesso à água tratada, dessa forma, estratégias sustentáveis de disposição final e com custos baixos ainda são necessárias.

4.3. Características químicas, físicas e mineralógicas dos LETAs

Existem diferentes tipos de LETAs conforme o tratamento empregado para purificação da água. Durante a etapa de coagulação, geralmente, se usa sulfato de alumínio, mais comum, ou sais de Fe para flocular partículas e remover a turbidez e a cor da água bruta (ELLIOT et al., 2002).

Além disso, outro tipo de LETA pode ser gerado durante o processo de abrandamento da água, nesse caso, cal é adicionada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) em conjunto com Na_2CO_3 , gerando um material alcalino com potencial de uso como corretivo de acidez.

As características químicas e físicas dos LETAs são influenciadas diretamente pelas práticas utilizadas durante o tratamento da água, o que deve ser considerado ao determinar sua destinação.

O LETA proveniente da adição de sulfato de alumínio reduz o fósforo (P) solúvel de solo com textura grosseira mais drasticamente do que LETA com adição de sais de Ferro (Fe) em função da maior reatividade dos óxidos de cada material (ELLIOT et al., 2002).

A capacidade de sorção de P dos LETAs é influenciada diretamente pela sua cristalinidade. LETAs de Al e Fe amorfos e recém precipitados adsorvem 10 a 100 vezes mais P do que sua forma cristalina análoga (MCKEAGUE et al., 1971).

Minerais como quartzo, feldspatos, calcita, ilita e esmectita, caulinita, mica, sílica e gibsitita são constituintes potenciais dos LETAs (IPPOLITO et al., 2009; PETTERLE et al., 2018), com partículas de morfologia irregular e grande variação de tamanho, resultando em arranjo altamente poroso (BABATUNDE et al., 2008).

4.4. Alternativas de uso dos LETAs

Diante dos problemas relacionados à disposição dos LETAs em aterros e despejo em corpos hídricos naturais, algumas alternativas vislumbrando o reuso desses materiais têm sido propostas (DASSANAYAKE et al., 2015; ZHAO et al., 2018; TURNER et al., 2019).

Os LETAs possuem grandes quantidades de hidróxido de Al amorfos e, elevada área superficial, conferindo alta capacidade de adsorção e de precipitação com metais

pesados. Com isso, pesquisadores têm sugerido o uso de LETAs no tratamento de efluentes como agente de remoção de metais pesados como Hg, Pb, Se, As, Cr e Cu.

Diversos estudos envolvendo LETAs relatam sua afinidade ao P em função da abundância de hidróxidos de Al nesses resíduos. Por isso, eles poderiam ser utilizados como adsorventes de P no tratamento de efluentes, tendo capacidade de imobilizar quase que totalmente o P de águas residuárias.

Os mecanismos envolvidos na remoção desse elemento são o aumento da adsorção e precipitação. Além disso, a grande proporção de hidróxidos de Al insolúveis que, geralmente, é encontrada nos LETAs promove a coagulação/floculação química.

A forma de ligação do P aos hidróxidos de Al insolúvel é a de esfera interna, onde os íons fosfato substituem os grupos funcionais na superfície dos LETAs e ficam presos, caracterizando o mecanismo de adsorção conhecido como troca de ligantes (MCKEAGUE et al., 1971). O pH da solução onde ocorrem essas reações desempenha papel chave, sendo que a adsorção é favorecida na faixa ácida.

Os potenciais de uso e eficiência de LETAs como inativadores de moléculas de agrotóxicos como glifosato e atrazina (ZHAO et al., 2015) e para remoção de poluentes como fluoreto, perclorato e corantes têxteis também têm sido relatados. Além disso, LETAs podem ser utilizados para remover óleo, graxa, demanda química de oxigênio e sólidos suspensos em águas residuárias.

Os LETAs podem ser utilizados no processo de condicionamento e desidratação de lodos de estação de tratamento de esgoto (LETEs). Nesse caso, o LETA pode ser destinado à estação de tratamento de esgoto, onde será misturado ao LETE para posterior secagem em pH específico. Sugere-se que o hidróxido de Al presente no LETA aumente a velocidade de sedimentação e facilite a desidratação do LETE, reduzindo, inclusive, o volume final de lodo gerado (TURNER et al., 2019).

Outra possibilidade seria o uso de “*wetlands*”, tecnologia para tratamento de diversos tipos de resíduos, sendo reconhecida como estratégia para tratamento de efluentes. Como os diferentes tipos de LETAs contêm resíduos de Al, Fe e Ca, os quais são eficientes adsorventes de vários poluentes, sua adição em substratos de *wetlands* construídas pode reduzir os teores de P e de vários outros poluentes do efluente em tratamento.

Os LETAs podem ser utilizados na fabricação de cimento e de tijolos como substituto parcial de argila (ALQAM et al., 2011). Além disso, podem ser utilizados

como matéria-prima para produtos de cerâmica e como forro de aterro. Existem outras destinações relatadas como em corantes e tintas, ração de frangos, e restauração de lagos, dentre outros.

4.5. Uso agrícola dos LETAs

As primeiras alternativas à disposição de lodos oriundos do tratamento de água originam-se na década de 70 (RUSSEL, 1975). Nessa época, a aplicação agrícola desses materiais já era considerada algo promissor em cidades como Illinois nos Estados Unidos.

Em 1985, Bugbee e Frink realizaram os primeiros experimentos vislumbrando a aplicação agrícola de LETAs com a adição de produtos à base de alumínio durante o processo de coagulação. Foram utilizados materiais de duas Estações de Tratamento de Água (ETAs), os quais tinham características semelhantes e causaram efeitos similares.

Os autores concluíram que o LETA favorece algumas propriedades físicas como aeração e água disponível, podendo aumentar o pH, porém, induz a deficiência por fósforo, reduzindo o crescimento e a absorção de P por alface (*Lactuca sativa*). Além disso, os autores conduziram, em vasos com mal-me-quer, um experimento adicional para confirmar os problemas de disponibilidade P oriundo da adição de LETAs (*Tagetes* cv. lemondrop). Mesmo com o dobro da dose recomendada de P, foi verificada deficiência de P nas plantas. Os autores também reportaram o aumento da absorção de Mn em função de maiores doses de LETA, porém, isso não prejudicou o desenvolvimento das plantas.

Ao aplicar os LETAs (na forma líquida com 1,5% de sólidos e com dose equivalente a 1/10 da usada no experimento em casa de vegetação) em áreas florestais, Bugbee e Frink (1985) conduziram um dos primeiros experimentos indicando a não influência dos LETAs sob a absorção de nutrientes pelas plantas, sendo verificado somente um sutil incremento do pH do solo.

Silveira et al. (2013) estudaram a aplicação superficial e incorporação de LETAs em um Espodossolo na Flórida utilizando doses de 0, 35 e 70 Mg ha⁻¹ e concluíram que, apesar de diminuir a concentração de P no tecido foliar de grama-forquilha (*Paspalum notatum*), os LETAs não diminuíram a produtividade de massa seca e a concentração de Ca e Mg no tecido foliar, indicando que os LETAs poderiam ser utilizados em áreas agrícolas, porém, é necessário o monitoramento da evolução

temporal de deficiência de P, principalmente, no caso de aplicações sucessivas desse resíduo.

Oraeji et al. (2009) indicam que os LETAs podem beneficiar a adsorção de P em solos arenosos sem prejuízos quanto a toxidez por alumínio e deficiência de outros nutrientes, entretanto, com diminuição de produção de massa seca de forrageiras. É importante ressaltar que esse estudo foi desenvolvido em solo com pH de aproximadamente 5,5, valor em que o efeito deletério desse elemento é potencializado.

Considerando que os possíveis efeitos positivos proporcionados pelos LETAs estão relacionados com o fornecimento de nutrientes, aumento da CTC e do armazenamento de água no solo e que esses resíduos possuem características similares às dos solos onde a ETA está inserida, é razoável supor que a sua aplicação seja dirigida, preferencialmente, à solos deficientes nesses quesitos.

Logo, destacam-se os solos arenosos e os degradados como principais destinos para a utilização agrícola dos LETAs. No Brasil, embora não haja dados oficiais sobre a quantidade de áreas degradadas, estima-se que existam cerca de 100 milhões de hectares de pastagens com grau moderado ou forte de degradação, demandando algum tipo de intervenção para controlar esse processo e recuperá-las (DIAS-FILHO, 2014). Entretanto, BITTENCOURT et al. (2012) indicam que os LETAs, isoladamente, não melhoram os atributos químicos do solo, sendo necessário sua associação com resíduos orgânicos para promover a recuperação de áreas degradadas.

Recentemente, diversas revisões de literatura têm apontado os principais problemas e potenciais benefícios vinculados ao uso agrícola dos LETAs (BABATUNDE; ZHAO, 2007; DASSANAYAKE et al., 2015; ZHAO et al., 2018; TURNER et al., 2019). Sendo assim, a possibilidade de reutilizar um resíduo produzido em grandes quantidades e, com potencial de melhorar alguns atributos físicos e químicos do solo é a principal vantagem do uso dos LETAs na agricultura (DASSANAYAKE et al., 2015).

A impopularidade e não aceitação da destinação agrícola dos LETAs até agora é atribuída a falta de conhecimento prévio acerca da composição deles, falta de legislação regulatória, riscos de efeitos fitotóxicos pela presença de Al trocável, indisponibilização do P e riscos de contaminação do solo e da água por contaminantes como os metais pesados ou Al, Fe e Mn disponíveis (DASSANAYAKE et al., 2015).

Além disso, a contradição e a falta de informações na literatura sobre os efeitos dos LETAs nas características químicas, físicas e biológicas do solo e no crescimento e desenvolvimento das plantas também são obstáculos para sua adoção agrícola.

4.5.1. Fitotoxicidade do Al e disponibilidade do P em função da incorporação de LETAs

A maioria das ressalvas em relação ao uso agrícola dos LETAs são realizadas devido à possibilidade de ocorrência de fitotoxicidade pela presença de Al solúvel e à deficiência do P disponível às plantas em resposta ao incremento de hidróxidos de Al ($\text{Al}(\text{OH})_3$) no solo e consequente sequestro do P da solução do solo.

O Al, quando solúvel, é capaz de inibir o crescimento das raízes das plantas, evidenciando seu efeito fitotóxico (LOMBI et al., 2010). Entretanto, a solubilidade desse elemento só ocorre em pHs ácidos uma vez que, com o aumento do pH, ocorre a precipitação do Al com oxidrila e a formação de hidróxido de Al. Ao estudar a solubilidade do Al em solos condicionados com LETAs, Lombi et al. (2010) demonstraram que a solubilização do Al ocorre em valores de pH entre 4,5 e 5,0 e, em solos não condicionados com LETAs, esse valor tende a estar entre 2,5 e 3,5.

A disponibilidade de nutrientes às plantas é influenciada por diversos fatores, entretanto, o pH do solo é considerado o principal deles em função de impactar diretamente várias reações químicas envolvendo nutrientes essenciais às plantas, elementos fitotóxicos e poluentes, governando, direta ou indiretamente, a disponibilidade dos nutrientes (PENN; CAMBERATO, 2019).

O P é considerado disponível às plantas quando solubilizado em uma das suas duas formas assimiláveis: H_2PO_4^- e HPO_4^- (SHEN et al., 2011). A solubilização do P é favorecida em pH próximo à neutralidade (cerca de 6,5), enquanto que, em pHs mais ácidos, ele tende a ser adsorvido por óxidos e hidróxidos de Fe e de Al como a Hematita, a Gibbsita e a Goethita até se tornar indisponível as plantas em função da formação de complexos de esfera interna sob ligações covalentes ou pela sua oclusão em nanoporos, frequentemente, presentes nesses óxidos. Além disso, em pHs básicos, maiores do que 8, o P tende a precipitar com o Ca, formando compostos mais estáveis e menos disponíveis as plantas como o fosfato octocálcico e hidroxiapatita (PENN; CAMBERATO, 2019; SHEN et al., 2011).

Portanto, como a manutenção do pH do solo em valores próximos de 6,5 promove a disponibilidade do P em detrimento da sua adsorção com hidróxidos de Al

ao mesmo tempo em que a solubilidade do Al é mitigada, o uso agrícola desses resíduos pode ser possível desde que estratégias de controle do pH dos LETAs e do solo sejam adotadas.

4.5.2. Combinação de LETAs com Lodos de Estação de Tratamento de Esgoto

A combinação de LETAs com resíduos orgânicos vêm sendo reportada como uma estratégia promissora e capaz de potencializar os possíveis efeitos positivos proporcionados pelos LETAs (IBRAHIM et al., 2015), uma vez que esses materiais, usualmente, são fontes de matéria orgânica e nutrientes como o N e o P (BITTENCOURT et al., 2012).

Nesse sentido, destacam-se os Lodos de Estação de Tratamento de Esgoto (LETES) os quais são resíduos semissólidos gerados em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) (YANG et al., 2018). Uma das principais ressalvas em relação à incorporação de LETES em solos agrícolas é a presença de micro-organismos patogênicos (PEREIRA et al., 2020) em níveis acima dos limites preconizados pela legislação (CONAMA, 2006), demandando a aplicação de técnicas capazes de inativar e isentar esse resíduo do risco de contaminação.

Além disso, assim como ocorre no caso dos LETAs, é necessário monitorar e certificar a ausência de metais pesados e outros contaminantes inorgânicos e orgânicos nos LETES (YANG et al., 2018), uma vez que esses podem ser fatores restritivos das doses utilizadas. Entretanto, pode-se considerar que a origem do LETE exerce grande importância quanto à possível presença de metais pesados. De modo geral, LETES produzidos em estações de tratamento de esgoto domiciliar não costumam apresentar teores de metais pesados em níveis acima daqueles preconizados pela legislação vigente.

4.5.3. LETAs e a agenda da Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável

Em 2015, os 193 países membros das Nações Unidas, incluindo o Brasil, traçaram 17 objetivos para direcionar as ações da comunidade internacional nos 15 anos seguintes e atingir o desenvolvimento sustentável global até 2030 (ONU, 2015). A viabilização da destinação agrícola de LETAs engloba, pelo menos, cinco desses objetivos, evidenciando a estreita relação desse trabalho com avanços no desenvolvimento sustentável do Brasil e do mundo:

Objetivo 2 – Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável;

Objetivo 6 – Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos;

Objetivo 11 – Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis;

Objetivo 12 – Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis;

Objetivo 15 – Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade.

Pode-se observar que a reciclagem de LETAs em solos apresenta elevado grau de aderência aos objetivos do desenvolvimento sustentável preconizados pela ONU.

4.6. Legislação sobre aplicação de LETAs no solo

De acordo com a Norma ABNT NBR 10.004, LETA é classificado como resíduo classe II-A não inerte em função de possíveis contaminantes químicos e orgânicos (ABNT, 2004)

Considerando a destinação de LETA no solo ou despejo em corpos hídricos, não há legislação específica que delimite ou sugira padrões de dosagens, concentrações de elementos químicos potencialmente tóxicos e de micro-organismos patogênicos (RAMALHO et al., 2015).

A resolução nº 375/2006 do CONAMA é uma alternativa que tem sido utilizada para fins de orientação para concentrações máximas de substâncias inorgânicas e patógenos, pois prevê limites no lodo gerado nas ETEs, visando a disposição em solos. Entretanto, a referida legislação é inadequada, uma vez que os LETAs são resíduos de origem totalmente distinta e, portanto, oferecem riscos ambientais menores do que LETEs, principalmente em relação a presença de patógenos.

Considerando a aplicação de resíduos como os LETAs no solo, existem os valores orientadores que permitem calcular as cargas máximas teóricas acumuladas de contaminantes em solos (CONAMA 420/2009). Adicionalmente, a Resolução FEPAM 85/2014, que dispõe sobre os valores de referência de qualidade para contaminantes inorgânicos no solo nas diferentes províncias geomorfológicas do RS, permite calcular doses máximas permissíveis de resíduos em solos.

Entretanto, assim como há para LETEs, a criação de regulamentação específica para destinação agrícola de LETAs torna-se premente, uma vez que tem sido caracterizado como um dos principais entraves para utilizá-lo em vários locais (ZHAO et al., 2018).

Essa legislação deve apresentar possíveis processos de tratamento do LETAs e limites máximos para presença de contaminantes químicos e orgânicos. Porém, estudos devem ser desenvolvidos para caracterizar os diferentes tipos de LETAs gerados, identificando seus riscos e potencialidades.

No Brasil, inexistente legislação semelhante e específica para esse fim. Este estudo apresenta-se como uma oportunidade de formar base e subsídios para elaboração de uma legislação direcionada para a reciclagem desse tipo de resíduo, que regule sua aplicação eficiente e segura em solos. Tal destinação poderá reduzir impactos ambientais pelo despejo de LETAs em mananciais, acúmulo em locais inapropriados ou pela disposição em aterros sanitários. Além disso, vislumbra-se que os LETAs poderão viabilizar a recuperação de áreas degradadas, e as companhias de saneamento poderão reduzir seus custos operacionais com a aplicação de LETAs em solos em detrimento de outras finalidades.

5. Capítulo 1 – Desempenho agrônômico de milho e azevém e atributos químicos de um Planossolo sob aplicação de doses de Lodos de Estação de Tratamento de Água

5.1. Introdução

A purificação de água para o consumo humano inclui etapas que geram um resíduo conhecido como lodo de estação de tratamento de água (LETA) (TURNER et al., 2019), sendo a destinação final deste material, um desafio em todo o mundo (ZHAO et al., 2018). Além disso, entre as principais alternativas sustentáveis para o aproveitamento do LETA, destaca-se a disposição em áreas agrícolas (DASSANAYAKE et al., 2015).

A destinação agrícola desses resíduos é baseada na premissa de serem compostos essencialmente por minerais de tamanho argila e silte, matéria orgânica e eventualmente possuírem nutrientes, sendo potencialmente capazes de melhorar a retenção de água e a agregação do solo (HEIL; BARBARICK, 1989; KIM et al., 2002; IBRAHIM et al., 2015).

Por outro lado, como o sulfato de alumínio é o insumo mais empregado no processo de coagulação para purificação de água, o conteúdo de enxofre e de alumínio somado a possível presença de outros contaminantes, como metais tóxicos ao meio ambiente, em especial às plantas, gera dúvidas sobre o seu uso em áreas agrícolas (WANG et al., 1998; TAY et al., 2017; WASSERMAN et al., 2018), principalmente quanto aos benefícios do ponto de vista agrônômico.

O potencial dos LETAs, tanto positivo quanto negativo, é dependente do tipo de manancial e dos tipos de solos da região onde a estação de tratamento está inserida e do processo de tratamento da água, que definirão as características químicas e físicas do LETA gerado (MAHDI et al., 2009; ZHAO et al., 2018).

Estudos científicos existentes relatam a presença de alumínio como uma das principais preocupações, em função de esse elemento ser tóxico às plantas e diminuir a disponibilidade de fósforo no solo quando na sua forma disponível (SILVEIRA et al., 2013).

A correção do solo ou dos próprios LETAs pode ser uma alternativa capaz de viabilizar a aplicação agrícola desses materiais. Além disso, a mistura com outros resíduos, fontes de matéria orgânica e nutrientes, como lodos de estação de tratamento de esgoto (LETES) é capaz de aumentar o potencial de adoção dos LETAs

(IBRAHIM et al., 2015). Entretanto, faltam informações sobre as melhores alternativas de correção e sua influência sobre os atributos do solo e o desenvolvimento de culturas de interesse agrícola.

Os atributos químicos do solo como o conteúdo de macro e micronutrientes, metais pesados, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions, pH, saturação por bases e por alumínio (MARTINAZZO et al., 2019) assim como variáveis agronômicas relacionadas ao crescimento, desenvolvimento e composição nutricional das plantas (SILVEIRA et al., 2013) são indicadores que podem ser utilizados para se determinar o efeito e a viabilidade da aplicação de resíduos no solo.

Estudos sobre a aplicação de LETAs em solos agrícolas demonstram que sua contribuição nutricional, seja pela baixa carga nutricional ou desajuste de pH, é pouca ou inexistente, sendo essa uma das limitações para o uso. Além disso, poucos apresentam alternativas e soluções conjuntas de LETAs a outros tipos de resíduos que possam ampliar o rol de seus benefícios. O desenvolvimento de insumos agrícolas com LETAs corrigidos, associados com outros resíduos torna-se uma oportunidade com potencial de reduzir impactos ambientais em mananciais, solos e aterros sanitários.

Neste contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar doses crescentes de LETAs e diferentes estratégias de preparo e combinação com LETE em relação: i) ao desempenho agrônômico de milho e azevém, ii) aos atributos químicos relacionados a fertilidade do solo, iii) à concentração metais pesados no solo e iv) à absorção de nutrientes e de metais pesados por plantas de milho e azevém.

5.2. Materiais e Métodos

O estudo foi desenvolvido na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, coordenadas geográficas 31°49'9.70"S e 52°26'23.50"O (Figura 1). O solo dessa área é um Planossolo Háplico Eutrófico arênico (CUNHA et al., 2013).



Figura 1 – Localização da área experimental (GOOGLE EARTH, 2020).

Os tratamentos consistiram de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹ de massa seca) de LETA solarizado moído e com pH corrigido, além de quatro tratamentos adicionais com LETA solarizado moído e sem correção do pH (30 ton ha⁻¹); LETA não solarizado com o pH corrigido (30 ton ha⁻¹); condicionador de solo comercial (à base de casca de pinus bioestabilizada) MecPlant (30 ton ha⁻¹) e mistura de LETA solarizado e moído com pH corrigido, com LETE solarizado e moído (30 ton ha⁻¹) na proporção de 75:25 de massa seca, respectivamente.

Para a correção do pH dos tratamentos, utilizou-se calcário dolomítico com 26,5% de CaO, 15% de MgO, poder de neutralização igual a 84,63% e poder relativo de neutralização total equivalente a 76,16%.

A solarização do LETA e do LETE foi realizada em estufa agrícola, em camadas de 0,1 m, até apresentar teor de umidade inferior a 20%. O LETA não solarizado apresentava teor de umidade de 50%. Posteriormente, os lodos foram moídos e peneirados, até obtenção de partículas de tamanho inferior a 2,0 mm. Os lodos foram obtidos de estações de tratamento da Companhia Rio-grandense de Saneamento (CORSAN).



Figura 2 – a) LC (LETA corrigido) ou LNC (LETA não corrigido) (ambos os tratamentos ficam com visual igual após a correção do pH), b) LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE), c) LUC (LETA úmido corrigido) sendo preparado em betoneira, d) COM (condicionador de solo comercial) disposto no solo antes da incorporação e e) imagem do experimento de campo durante a semeadura do milho.

A área experimental, originalmente manejada na forma de campo nativo pastejado, foi preparada através de aração e gradagem, cerca de um mês antes da instalação do experimento.

O delineamento experimental empregado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, sendo cada unidade experimental formada por uma área de 25 m². O experimento foi implantado em 22/01/2019, quando os tratamentos foram dispostos manualmente sobre a superfície das parcelas e, posteriormente, incorporados com grade de discos na camada de 0,0 a 0,2 m.

Foram coletadas amostras de solo com estrutura não preservada aos 90 dias da implantação do experimento nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m. Elas foram obtidas com o auxílio de pá de corte, passadas em peneira de 2 mm e enviadas para o Laboratório de Química do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) para a quantificação de: pH_{H2O}, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions efetiva, do teor de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, ferro, manganês, cobre, zinco, boro e saturação da capacidade de troca de cátions por bases e por alumínio.

Nas camadas de 0,0 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m, foram coletadas amostras do mesmo tipo para a determinação da concentração de metais pesados, porém, somente as amostras referentes às doses de LETAs (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) e do condicionador de solo comercial foram analisadas.

Tabela 1 - Características químicas das matérias-primas avaliadas no presente estudo.

Variável	Unidade	LC	LNC	LUC	LA:LE	LETE	COM
Densidade	Mg m ³	1,04	1,03	1,09	0,97	0,72	0,55
pH _{H2O}		7,20	6,30	5,70	6,90	7,70	5,30
COT	%	10,80	9,22	4,27	15,70	13,20	7,32
CTC	mmol kg ⁻¹	478,00	517,00	366,00	538,00	550,00	989,00
N total	mg kg ⁻¹	613,00	1424,00	491,00	1810,00	2977,00	2177,00
P	mg kg ⁻¹	1198,00	1682,00	539,00	5257,00	75204,00	366,00
K	mg kg ⁻¹	2075,00	2050,00	9018,00	3611,00	10420,00	3809,00
Ca	mg kg ⁻¹	3382,00	2445,00	3133,00	17203,00	59329,00	23488,00
Mg	mg kg ⁻¹	3536,00	2956,00	11923,00	7438,00	21895,00	9852,00
S	mg kg ⁻¹	10720,00	7182,00	8411,00	13072,00	26127,00	3557,00
Al	mg kg ⁻¹	101249,00	107872,00	227959,00	61080,00	11633,00	9620,00
Fe	mg kg ⁻¹	25170,00	27067,00	98017,00	13621,00	78475,00	14227,00
Mn	mg kg ⁻¹	1340,00	1277,00	427,40	941,90	1478,00	426,00
Cu	mg kg ⁻¹	38,81	39,96	45,03	134,40	493,10	26,02
Zn	mg kg ⁻¹	64,00	78,80	130,20	456,40	3986,00	79,20
B	mg kg ⁻¹	<5811,00	< 5,724	< 5,655	< 6,572	< 5,372	< 12,930
Na	mg kg ⁻¹	251,10	240,20	416,00	375,00	463,00	640,00
Hg	mg kg ⁻¹	< 0,011	< 0,011	< 0,011			
Cr ⁶⁺	mg kg ⁻¹	1,35	1,39	0,33			
Se	mg kg ⁻¹	< 0,268	< 0,285	< 0,280			
Cd	mg kg ⁻¹	< 0,161	< 0,171	< 0,168			
As	mg kg ⁻¹	5,26	12,65	8,10			
Ni	mg kg ⁻¹	13,75	4,48	7,02			
Pb	mg kg ⁻¹	17,89	19,87	16,33			
Ba	mg kg ⁻¹	16,50	97,62	49,93			
Mo	mg kg ⁻¹	3,20	< 0,285	< 0,280			

¹LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). ²COT (Carbono orgânico total) conforme Manual de Métodos de Análise de Solo (TEIXEIRA et al., 2017); ³CTC (capacidade de troca de cátions) conforme Instrução Normativa n° 28 de 27/07/2007 (MAPA, 2007).

A cultura do milho foi semeada no dia 29/01/2019, visando uma população de 60.000 plantas ha^{-1} . A calagem e a adubação seguiram as recomendações técnicas para a cultura (CQFS-RS/SC, 2016).

As variáveis avaliadas foram altura de planta, diâmetro do colmo, índice de clorofila e massa seca da parte aérea, 60 dias após a semeadura. As avaliações foram realizadas em 15 plantas coletadas aleatoriamente dentro de cada parcela.

A determinação da altura de planta foi obtida com o auxílio de trena, enquanto que, para a medida do diâmetro de colmo, foi utilizado um paquímetro digital. O índice de clorofila das plantas foi determinado em duas folhas por planta com auxílio de um clorofilômetro portátil (ClorofiLOG - Falker Automação Agrícola Ltda., Porto Alegre-RS). Após a realização da amostragem e das avaliações, a cultura do milho foi colhida e retirada da parcela, como se fosse utilizado para silagem.

A cultivar de azevém BRS Ponteio foi semeada à lanço dia 30/04/2019 com densidade de 35 kg ha^{-1} de sementes. Não houve adubação de base e foram aplicados 57 kg ha^{-1} de N em cobertura 30 dias após semeadura. A massa seca do azevém foi avaliada 90 dias após a semeadura. Foi amostrado 1 m^2 dentro de cada parcela através da coleta de 4 sub amostras com 0,25 m^2 em cada quadrante.

Após as avaliações descritas para as culturas do milho e azevém, amostras da parte aérea das plantas foram coletadas, secas em estufa a 65 °C até massa constante, moídas em moinho de amostras, homogeneizadas e enviadas para análise nos laboratórios de Análise de Solo da Universidade Federal de Santa Maria e na Central Analítica da Embrapa Clima Temperado para análise da concentração de nutrientes no tecido vegetal de milho e azevém, respectivamente.

Os resultados das variáveis-resposta obtidos no experimento foram submetidos a análise de normalidade de distribuição de frequência e verificação quanto à presença de valores discrepantes, procedendo-se então a análise da variância (teste F). As variáveis-resposta referentes às doses de LETA solarizado com pH corrigido, em que houve efeito significativo, foram submetidas à análise de regressão polinomial, enquanto que as variáveis-resposta referentes aos tratamentos com dose única de 30 ton ha^{-1} , em que foi verificada diferença mínima significativa, o teste de Duncan ($p < 0,05$) foi aplicado, utilizando o software Winstat (MACHADO; CONCEIÇÃO, 2003).

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Desempenho agronômico das culturas do milho e do azevém

As variáveis AP e MS apresentaram resposta quadrática às doses crescentes de LETA (Figura 3). De acordo com as equações obtidas, as doses de máxima eficiência técnica, considerando altura e massa seca das plantas, foram de 26,7 e 27,3 ton ha⁻¹ respectivamente, demonstrando que os LETAs propiciaram melhores condições para o desenvolvimento de plantas em doses próximas a 30 ton ha⁻¹.

Em contrapartida, a MS do segundo cultivo (azevém) não apresentou regressão significativa, indicando que a produtividade da cultura não foi influenciada pelas diferentes doses dos LETAs.

Os resultados obtidos com os dois cultivos evidenciam que as doses de LETA testadas não ocasionam efeitos negativos nas variáveis agronômicas de plantas de milho e azevém, porém, mais estudos são necessários para confirmar os efeitos positivos verificados para o cultivo do milho.

Scalizi et al. (2018) indicaram que as doses de 204 e 417 g kg⁻¹ (relação LETA/mistura de solo e substrato) proporcionaram os melhores resultados nas variáveis de crescimento de mudas de quatro espécies de plantas nativas do Cerrado, enquanto que doses de 638 e 869 g kg⁻¹ não foram favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das mudas.

Silveira et al. (2013) testaram doses de LETAs até o máximo de 70 ton ha⁻¹ em dois anos consecutivos e não verificaram efeitos na produção de forragem de *Paspalum notatum*, indicando que os LETAs não causaram efeitos negativos nem positivos nas variáveis agronômicas de gramíneas.

Não houve relação entre as doses de LETA aplicadas com diâmetro do colmo e índice de clorofila das plantas de milho (Figura 3).

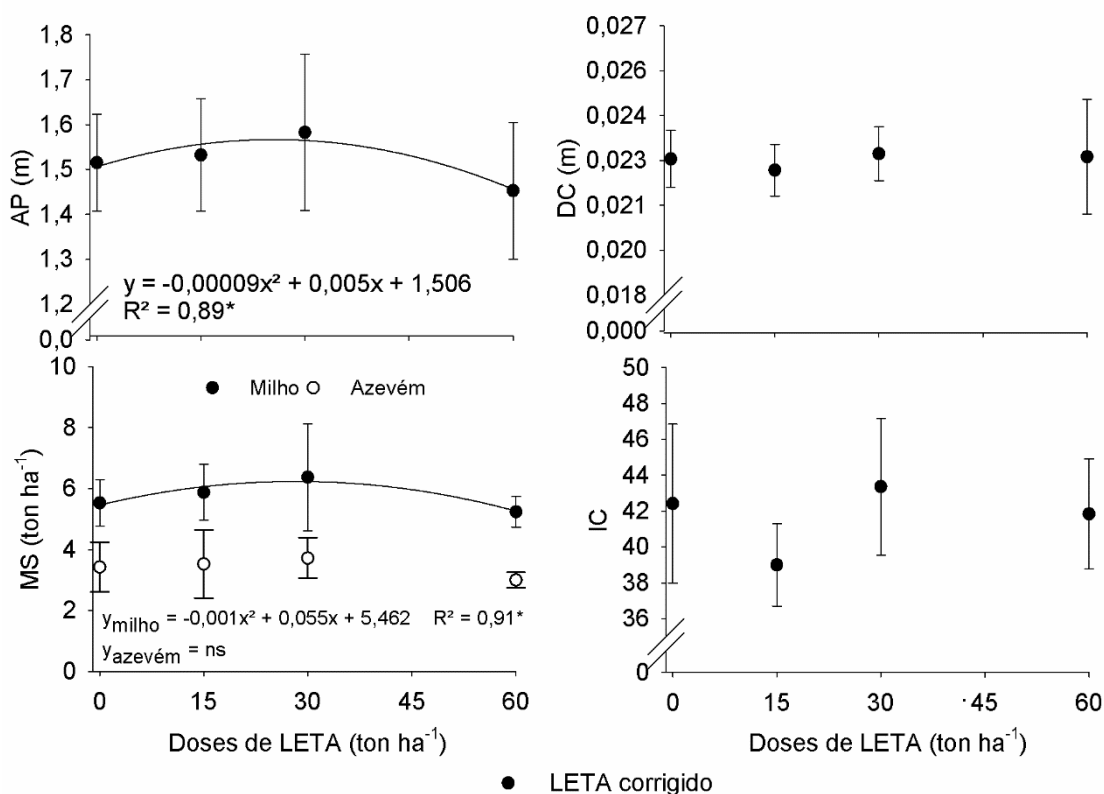


Figura 3 - Altura das plantas (AP), diâmetro do colmo (DC), massa seca (MS) e índice de clorofila (IC) de plantas de milho e de azevém cultivadas em um Planossolo em resposta a doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido.

Analisando-se os diferentes tratamentos balizados pela dose de 30 ton ha⁻¹ (Figura 4), verifica-se que o COM e o LA:LE proporcionaram os maiores valores de AP e MS nas plantas de milho.

Mahdi et al. (2009) também encontraram maior produção de biomassa de milho cultivado em casa de vegetação ao combinar LETAs com bio sólidos na proporção de 1:1 com dose de 3% (massa/massa), atribuindo esse efeito, sobretudo, à maior disponibilidade de P.

O segundo cultivo (azevém) confirma que o tratamento com LA:LE favorece o crescimento vegetativo das plantas ao aumentar sua MS. Por outro lado, o COM e os tratamentos com LETA na composição foram iguais entre si e não diferiram da testemunha. Considerando que o COM foi o melhor tratamento no primeiro cultivo, juntamente com o LA:LE, provavelmente a maior parte do N nesse material foi liberada nos primeiros meses de tratamento, não tendo efeito residual para a cultura do azevém.

Para a variável DC do milho, o tratamento LA:LE foi superior à LNC e LUC, além de ter apresentado maior IC que os demais. Provavelmente, os resultados foram influenciados diretamente pelo teor de N. Deste modo, a mistura de LETA com LETA demonstra ser favorável em função, principalmente, do aumento de N o qual induz o crescimento vegetativo das plantas.

Ibrahim et al. (2015) estudaram a combinação de LETAs com vermicomposto como material condicionador de solo e verificaram aumento da produtividade de trigo cultivado em vaso em função da melhoria de atributos físicos e químicos do solo, principalmente, na proporção 2:1 na dose de 5 g kg⁻¹.

Os tratamentos contendo somente LETA apresentaram resultados similares à testemunha em todas as variáveis estudadas. Sendo assim, mesmo que a aplicação de LETAs não proporcione benefícios, ela não causa efeitos deletérios às plantas (ZHAO et al., 2018).

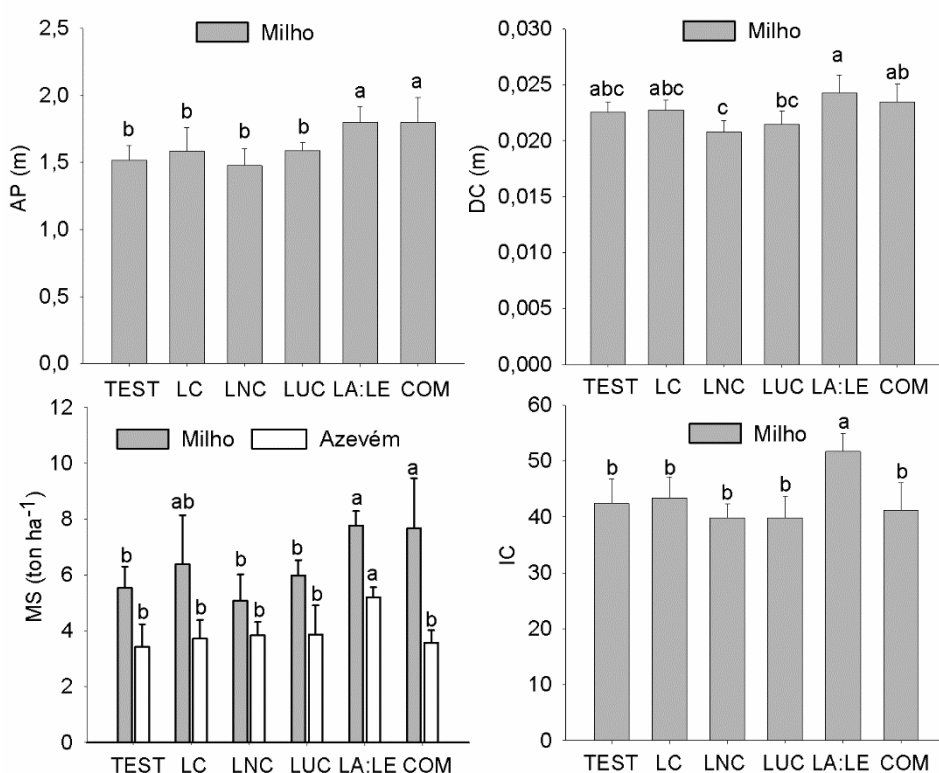


Figura 4 - Altura das plantas (AP), diâmetro do colmo (DC), massa seca (MS) e índice de clorofila (IC) de milho e de azevém cultivadas em um Planossolo sob aplicação de dose de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras seguidas por letras distintas representam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan ($p < 0,05$).

5.3.2. Atributos químicos relacionados à fertilidade do solo

Os resultados das interações entre as doses crescentes de LETAs e as variáveis relacionadas à fertilidade do solo são apresentados nas Figuras 5, 6 e 7. A única variável relacionada à fertilidade do solo que apresentou dependência das doses de LETAs foi o B na camada de 0,0 a 0,1 m (Figura 7).

Portanto, nenhum dos macros e micronutrientes analisados foram influenciados pela adição crescente de LETAs ao solo nas três camadas avaliadas, tendendo a permanecer, nas mesmas faixas de classificação de acordo com CQFS-RS/SC (2016).

Esses resultados indicam que os LETAs avaliados neste estudo não são fontes de nutrientes, mas também não diminuem a disponibilidade de P e nem aumentam os teores disponíveis de Al, Fe e Mn no solo.

Esses resultados diferem do reportado por Silveira et al. (2013) que verificaram diminuição do P disponível no solo em função de doses crescentes de LETAs. Entretanto, o pH do solo onde o estudo foi conduzido era inferior a 5,5, o que, possivelmente, explica a divergência entre os resultados, ou seja, o pH é um fator determinante para que não haja deficiência de P e Al trocável no solo.

Mahdi et al. (2009) ressaltam que os LETAs diminuem o P e aumentam o Al disponível no solo, porém, seria necessário, pelo menos, uma dose de cerca de 90 ton ha⁻¹ incorporada na camada de 0,00 a 0,15 m para que esse efeito fosse verificado. Além disso, essa dinâmica é influenciada diretamente pelo pH que, estando próximo de 6,5, não resultaria em problemas de fitotoxicidade por Al e deficiência de P.

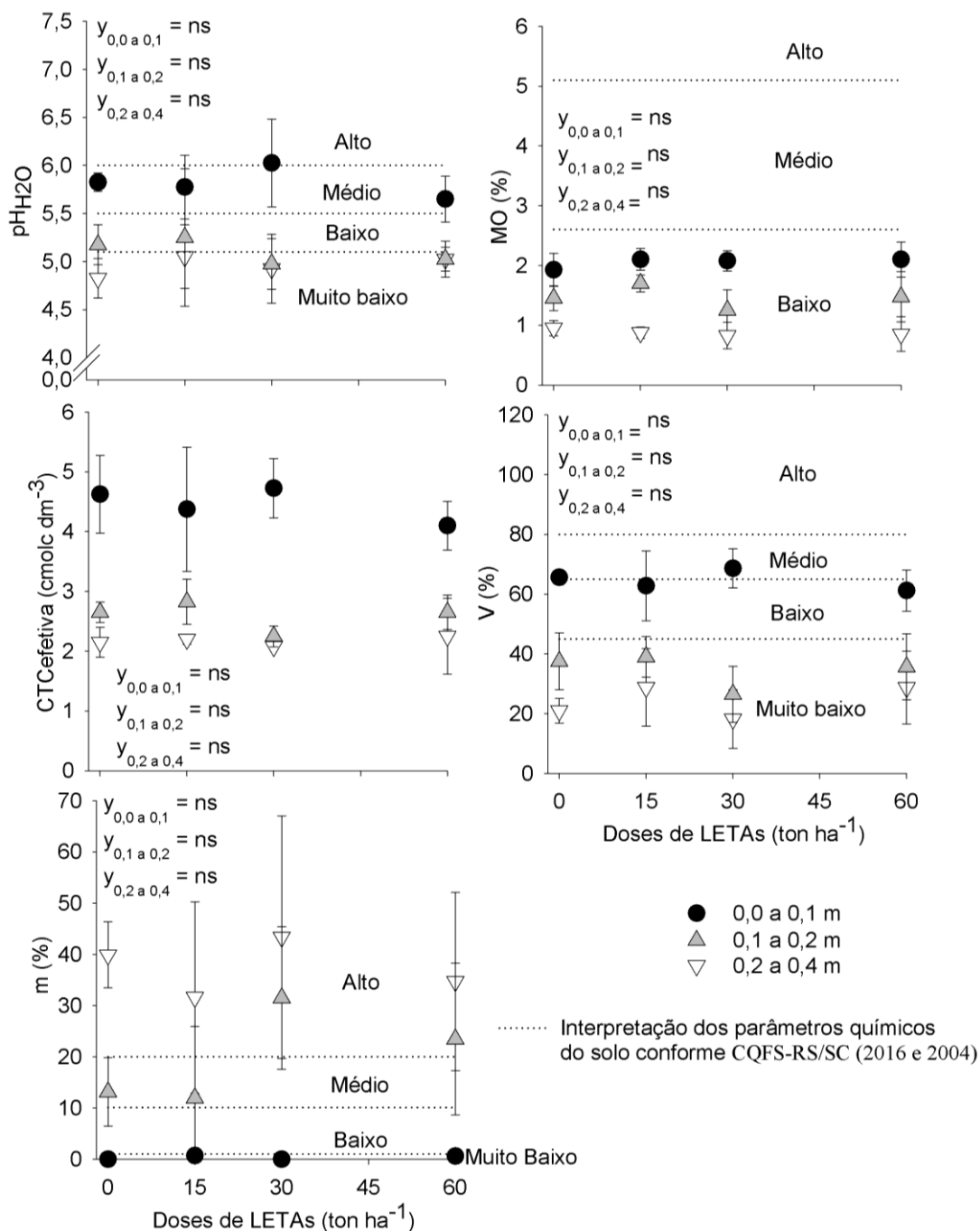


Figura 5 – Valores médios de pH_{H2O}, Matéria orgânica (MO), Capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva, Saturação da CTC por bases (V%) e saturação da CTC por Alumínio (m%) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido.

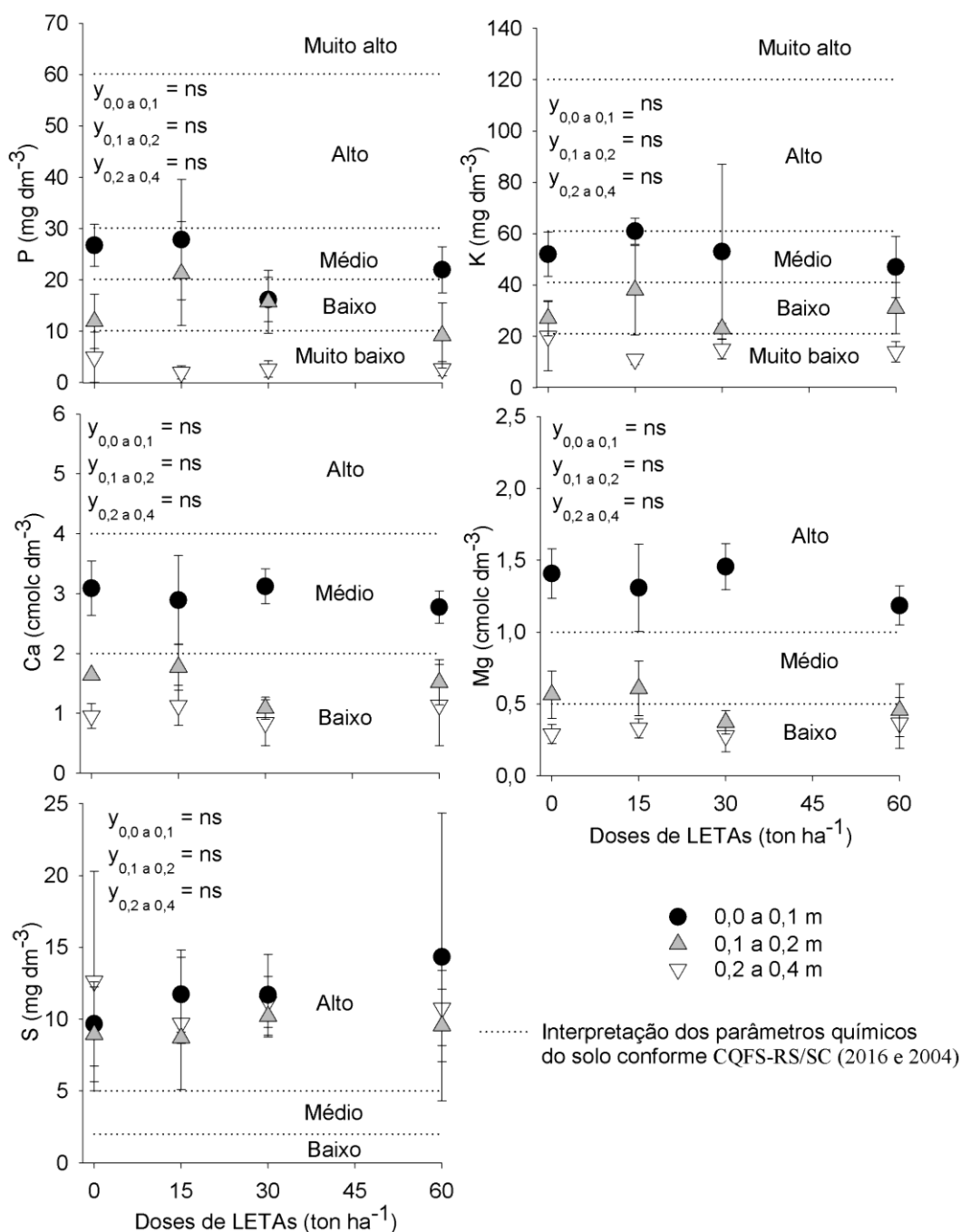


Figura 6 –Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido.

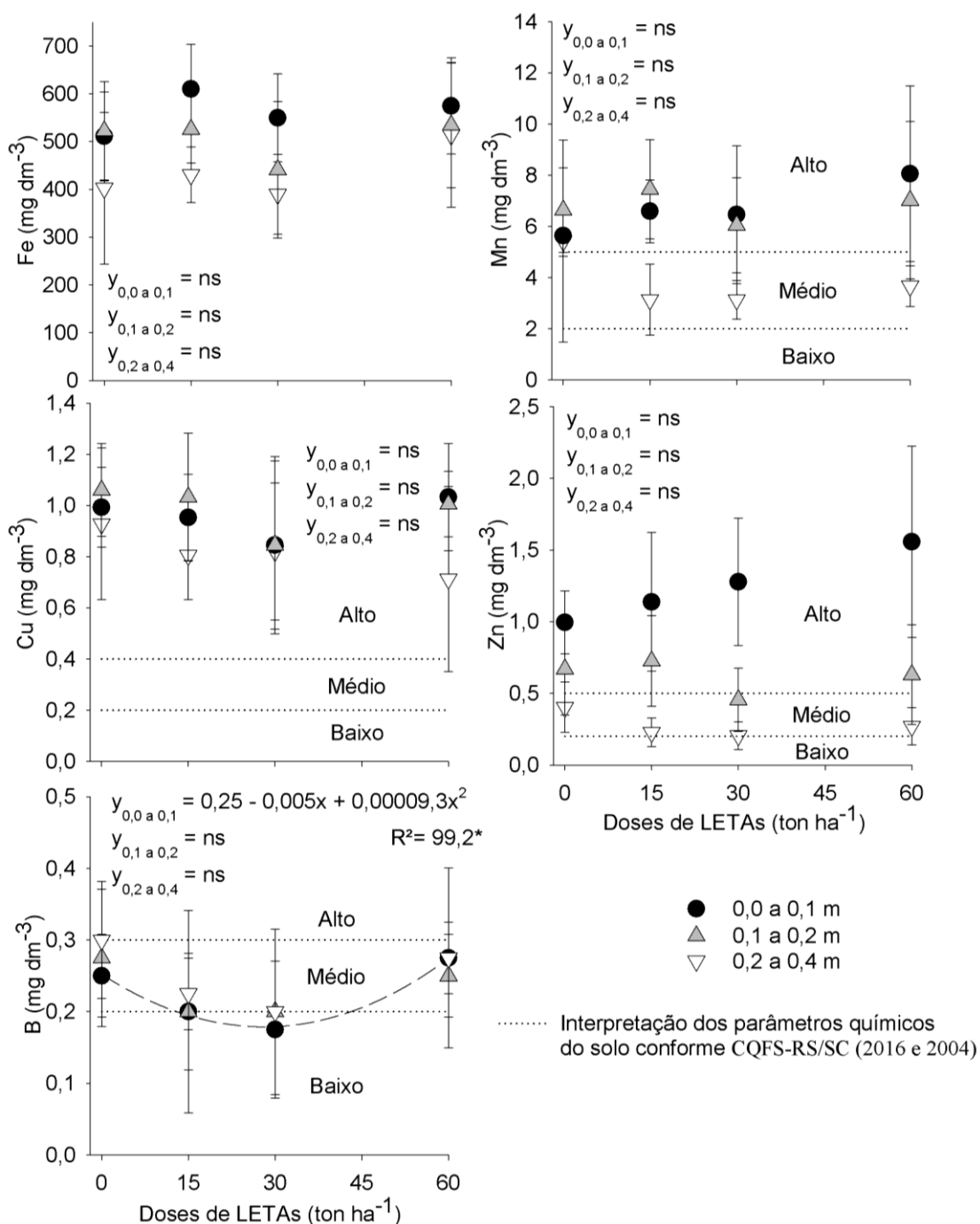


Figura 7 –Ferro (Fe), Manganês (Mn). Cobre (Cu), Zinco (Zn) e Boro (B) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido.

O LA:LE destaca-se como um material capaz de aportar quantidades significativas de P, Cu e Zn para o solo na camada de 0,0 a 0,1 m (Figuras 9 e 10). Considerando que o P é um macronutriente que, na maioria das vezes, encontra-se em deficiência no solo e é suprido por adubação e que o Cu e o Zn são exigidos em pequenas quantidades pelas culturas agrícolas, evidencia-se que a adição de LETEs

em combinação com LETAs é uma alternativa promissora para solos agrícolas. O COM demonstrou ser fonte de MO, P e S ao aumentar os teores desses elementos na camada de 0,0 a 0,1 m (Figuras 8 e 9).

Além disso, a combinação de LETAs com materiais orgânicos fontes de P é uma alternativa capaz de mitigar problemas de perdas de P via escoamento superficial em função da capacidade do LETA em adsorver esse elemento (MAHDI et al., 2009).

É importante ressaltar que nenhum dos tratamentos contendo LETAs foi inferior à testemunha, mostrando que não há redução significativa da disponibilidade dos nutrientes com a adição desses materiais ao solo, tampouco aumento substancial dos teores disponíveis de Fe, Mn e Al (Figuras 8, 9 e 10).

A camada de 0,2 a 0,4 m não foi influenciada pela incorporação superficial dos tratamentos, indicando que não houve mobilidade vertical dos elementos analisados no experimento.

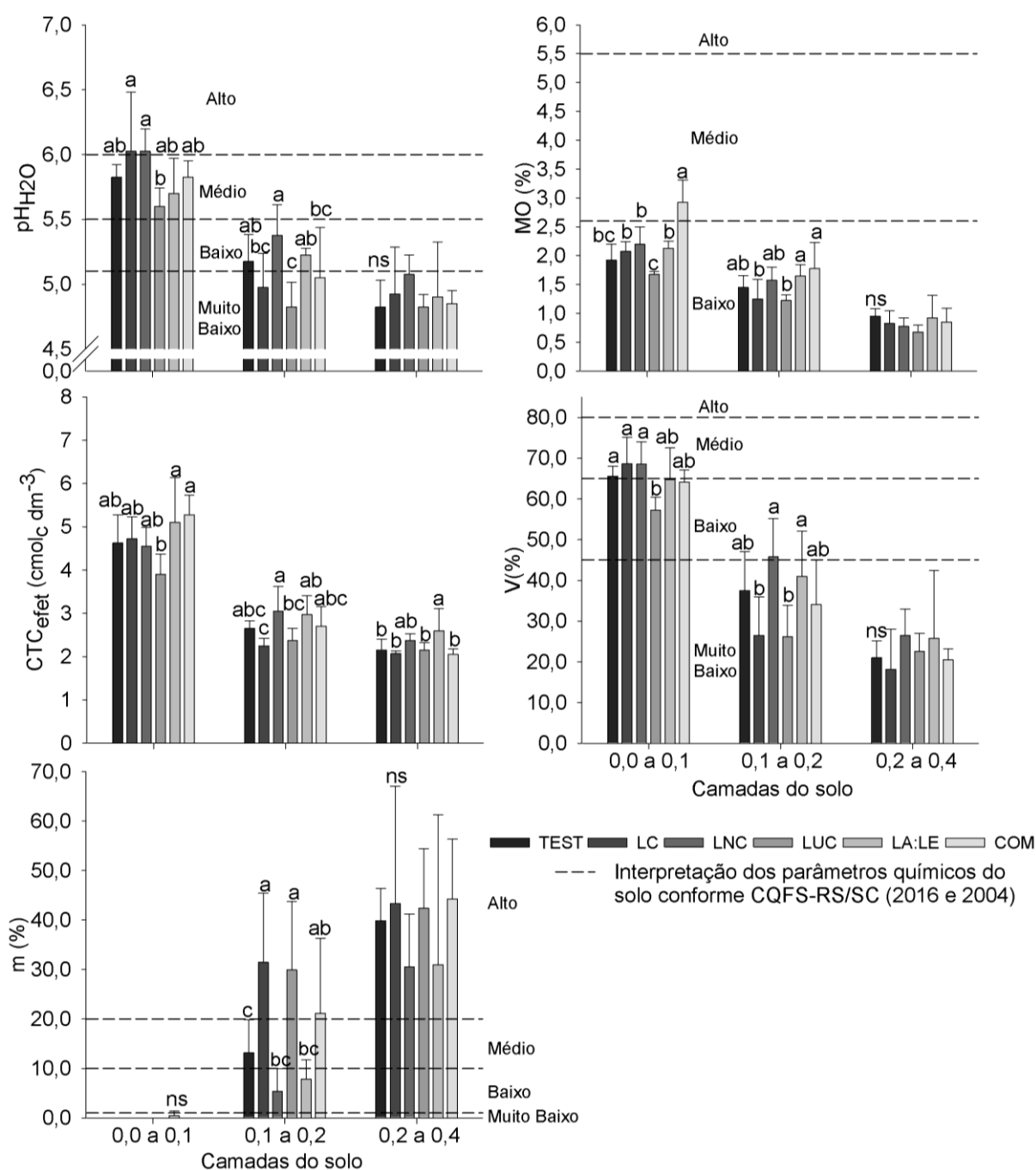


Figura 8 – Valores médios de pH_{H2O}, Matéria orgânica (MO), Capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva, saturação da CTC por bases (V%) e saturação da CTC por alumínio (m%) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função da aplicação de doses de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras seguidas por letras distintas representam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan (p<0,05).

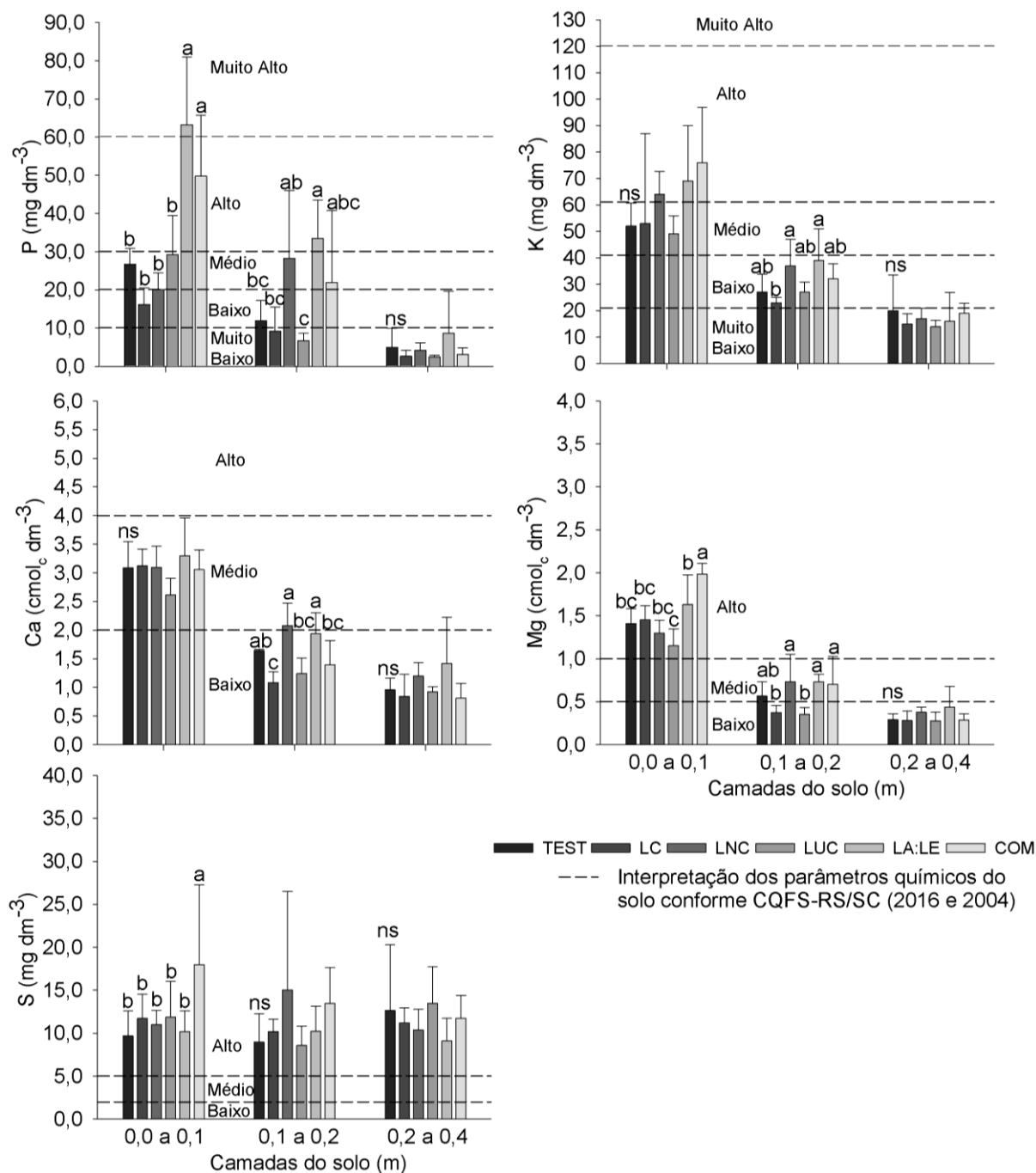


Figura 9 – Valores médios de Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função da aplicação de doses de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras seguidas por letras distintas representam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan (p<0,05).

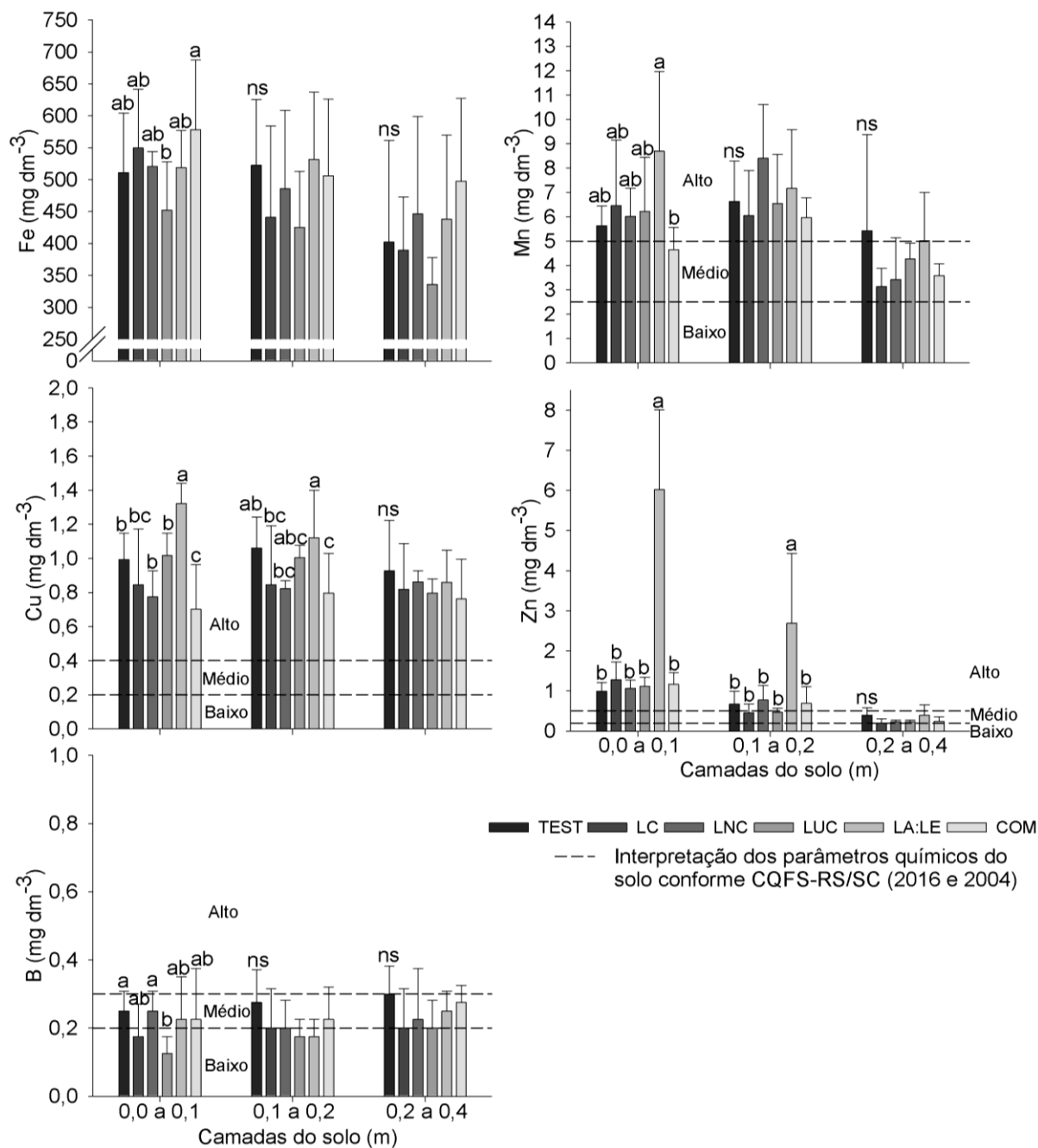


Figura 10 – Valores médios de Ferro (Fe), Manganês (Mn), Cobre (Cu), Zinco (Zn) e Boro (B) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função da aplicação de doses de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras seguidas por letras distintas representam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan ($p < 0,05$).

5.3.3. Concentração de metais pesado no solo

De acordo com a resolução CONAMA nº 420 de 2009, os valores de prevenção significam a concentração limite de determinada substância no solo, tal que seja capaz de sustentar suas funções principais.

Ademais, os valores de referência de qualidade referem-se à concentração de determinada substância no solo que define sua qualidade natural, a qual deve ser determinada com base na interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras representativas dos solos de uma determinada região.

Deste modo, os tratamentos com LETAs não ocasionaram valores de Mo e de metais pesados maiores do que a legislação ambiental brasileira sugere, assim como não foram superiores aos valores apresentados pelo COM, produto já registrado junto ao MAPA e comercializado como condicionador de solo (Tabela 2). Portanto, não foi identificado risco de contaminação do solo por substâncias inorgânicas monitoradas neste estudo, em função da aplicação de doses de até 60 ton ha⁻¹ de LETAs, nas condições testadas.

Além disso, os tratamentos utilizados não resultaram em concentrações médias de metais pesados acima dos valores de referência de qualidade recomendados para o Estado do Rio Grande do Sul (ALTHAUS et al., 2018), reforçando o fato de que os materiais e doses utilizados não aportam quantidades relevantes de contaminantes inorgânicos ao solo (Tabela 2).

Zhao et al. (2018), ao analisar resultados de pesquisa envolvendo uso agrícola de LETAs publicados nos últimos 30 anos, indicaram que a concentração de metais pesados não é um fator limitante para o uso desses materiais em solos agrícolas. Apesar de existirem casos esporádicos de LETAs com conteúdo alto de alguns metais pesados como As e Cr, eles não costumam apresentar concentrações relevantes de elementos tóxicos.

Tabela 2 – Concentrações médias de Molibdênio (Mo), Mercúrio (Hg), Selênio (Se), Arsênio (As), Cromo (Cr) tri e hexavalente, Chumbo (Pb), Bário (Ba), Níquel (Ni) e Cádmio (Cd) de um Planossolo nas camadas de 0,0 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em função de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido e de 30 ton ha⁻¹ de condicionador de solo comercial (COM).

Tratos	Mo total	Hg total	Se total	As Total	Cr ⁺³ total	Cr ⁺⁶ total	Pb total	Ba total	Ni total	Cd total
(mg kg ⁻¹)										
Camada de 0,0 a 0,2 m										
0	< 2,03	< 0,10	< 1,53	< 1,53	< 0,15	< 0,15	4,90 ± 0,58	16,75 ± 5,10	< 2,03	< 1,02
15	< 1,98	< 0,13	< 1,49	< 1,49	< 0,15	< 0,15	4,35 ± 1,56	18,62 ± 1,66	< 1,98	< 0,99
30	< 2,01	< 0,10	< 1,51	< 1,51	< 0,15	< 0,15	4,79 ± 0,27	15,47 ± 1,33	< 2,01	< 1,01
60	< 2,05	< 0,10	< 1,54	< 1,54	< 0,15	< 0,15	5,10 ± 0,41	17,80 ± 2,23	< 2,05	< 1,02
COM	< 2,03	< 0,10	< 1,52	< 1,52	< 0,15	< 0,15	4,29 ± 0,21	15,67 ± 0,39	< 2,03	< 1,01
Camada de 0,2 a 0,4 m										
0	< 2,06	< 0,10	< 1,55	< 1,55	< 0,15	< 0,15	4,63 ± 0,31	14,97 ± 2,87	< 2,06	< 1,03
15	< 2,02	< 0,10	< 1,51	< 1,51	< 0,15	< 0,15	5,09 ± 0,53	17,27 ± 0,74	< 2,02	< 1,01
30	< 2,01	< 0,10	< 1,51	< 1,51	< 0,15	< 0,15	4,00 ± 0,86	11,94 ± 3,03	< 2,01	< 1,01
60	< 2,00	< 0,10	< 1,50	< 1,50	< 0,15	< 0,15	4,97 ± 0,33	16,77 ± 2,93	< 2,00	< 1,00
COM	< 1,96	< 0,10	< 1,47	< 1,47	< 0,15	< 0,15	4,65 ± 0,71	15,15 ± 3,38	< 1,94	< 0,98
Valores de prevenção no solo estabelecidos pela resolução CONAMA 420/2009										
	30	0,5	5	15	75	75	72	150	30	1,3
Valores de referência de qualidade, no percentil 90, dos teores naturais de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul (ALTHAUS et al., 2018)										
	-	0,05	-	-	28	28	20	-	10	0,39

5.3.4. Absorção de nutrientes e de metais pesados por plantas de milho e de azevém

As Figuras 11 e 12 apresentam as concentrações de elementos químicos encontrados no tecido vegetal de milho e azevém. Na cultura do milho, foi verificada regressão linear positiva para o Mn e regressão linear negativa para o P e o Zn, enquanto que, na cultura do azevém, o P e o Zn mostraram resposta quadrática às doses de LETAs, sendo que o ponto de inflexão é próximo à 30 ton ha⁻¹ (figura 11).

Considerando o tratamento testemunha e a dose máxima de LETA (60 ton ha⁻¹), o valor médio de Mn passou de 86 e 197 mg kg⁻¹ para 120 e 221 mg kg⁻¹ no tecido de milho e azevém, respectivamente, ou seja, um aumento de 40 e 12%. Sendo assim, mesmo que não tenha sido identificada regressão significativa para o Mn na cultura do azevém, há risco de haver problemas por fitotoxicidade do elemento se forem utilizadas doses maiores ou iguais a 60 ton ha⁻¹ de LETAs. Por outro lado, a dose de 30 ton ha⁻¹ não diferiu estatisticamente da testemunha e não causou nenhum prejuízo ao desempenho agrônomo das culturas e, por isso, é considerada segura.

O P e o Zn diminuíram, na cultura do milho, de 3,6 g kg⁻¹ e 41 mg kg⁻¹ para 3,0 g kg⁻¹ e 33 mg kg⁻¹, respectivamente, representando uma redução de 17 e 20%. Já no

azevém, houve resposta quadrática e os valores das doses no ponto de inflexão foram iguais a 37,75 e 39,48 ton ha⁻¹ para o P e o Zn, respectivamente. Além disso, o P e o Zn passaram de 2,6 g kg⁻¹ e 17,1 mg kg⁻¹, na testemunha, para 2,1 g kg⁻¹ e 13,5 mg kg⁻¹, nos pontos de inflexão, diminuindo 19 e 21%, respectivamente.

Apesar de a dose de 30 ton ha⁻¹ de LETA ter diminuído o teor médio de P e Zn no tecido vegetal de ambas as culturas, como a produção de massa seca das plantas não foi influenciada no azevém e foi beneficiada no caso do milho, considera-se essa dose como segura e não suficiente para causar efeitos deletérios. Por outro lado, a dose de 60 ton ha⁻¹, possivelmente, reduz a produtividade das plantas em função da indisponibilização, principalmente, de P.

Todos os outros elementos não foram modificados pelo aporte de LETAs ao solo, indicando que esses materiais não afetam a absorção, inclusive, de elementos químicos considerados fitotóxicos como Fe, Mn e Al.

Confirmando esses resultados, Silveira et al. (2013) verificaram que doses crescentes de LETAs são capazes de diminuir o teor foliar de P em plantas de *Paspalum notatum* cultivadas em condições de campo, entretanto, essa menor absorção do nutriente também não foi suficiente para causar efeitos negativos na produtividade e não esteve abaixo do limite crítico para a cultura. No mesmo estudo, os autores não verificaram aumento do teor de Al no tecido vegetal.

O solo onde Silveira et al. (2013) conduziu o estudo apresentava pH inferior a 5,5, fato que pode justificar a diminuição da absorção de P pelas plantas ter sido mais proeminente.

Scalizer et al. (2018) verificaram que o aumento da proporção de LETAs em relação à mistura de solo e substrato para produção de mudas, em doses de até 869 g kg⁻¹, não influencia a concentração dos principais elementos químicos no tecido vegetal de mudas de quatro espécies florestais nativas do Cerrado.

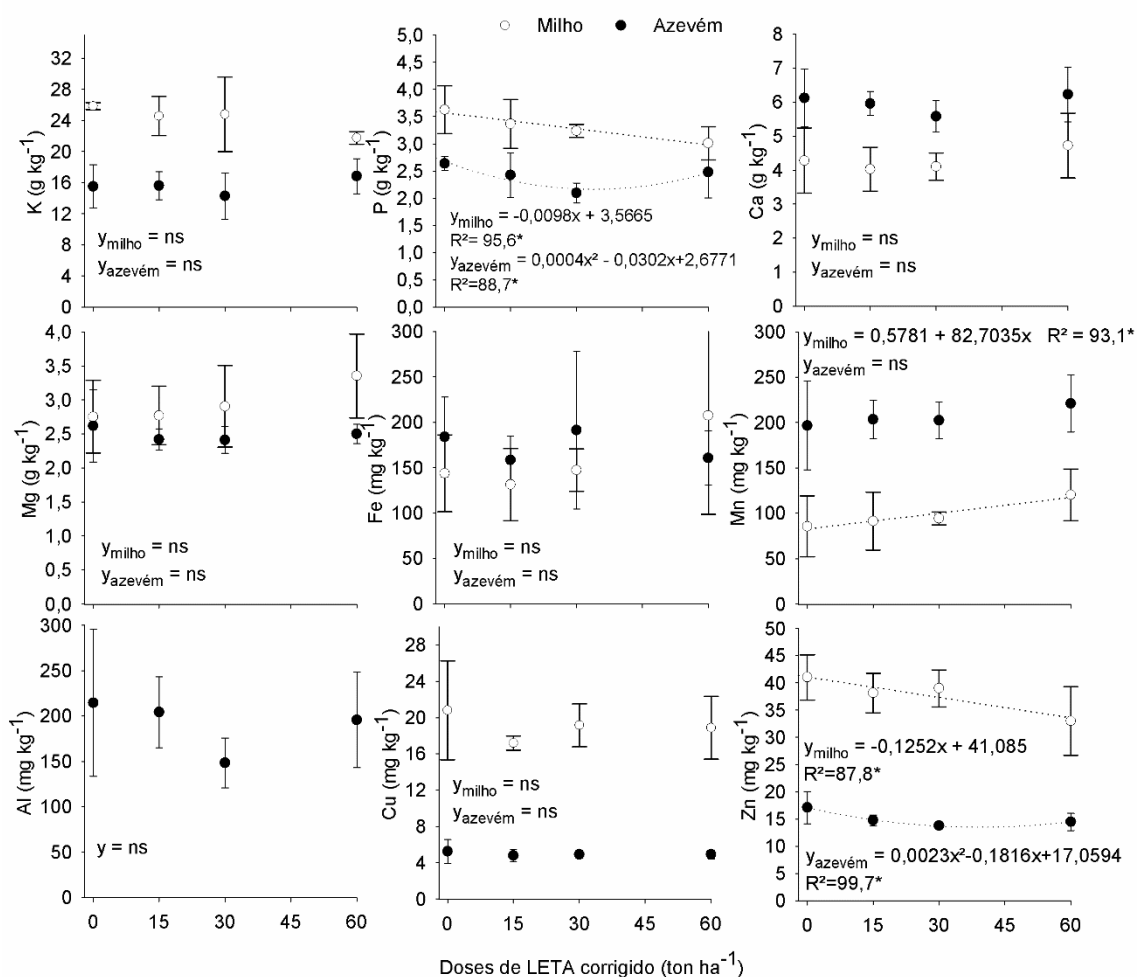


Figura 11 – Teores médios de Potássio (K), Fósforo (P), Cálcio (Ca), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Alumínio (Al), Cobre (Cu) e Zinco (Zn) no tecido foliar de plantas de milho e de azevém cultivadas em um Planossolo em resposta a doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido.

O LA:LE apresentou tendência de elevar a absorção de Mg nas duas culturas e de Fe no milho (Figura 12). Ademais, não houveram diferenças significativas em todos outros elementos avaliados nas plantas de milho.

Os resultados do teor de nutrientes na parte aérea das plantas de azevém reforçam que o LA:LE é fonte de P, Cu e Zn. Além disso, esse tratamento também aumentou a absorção de Ca pela cultura.

Esses resultados mostram que a absorção de nutrientes pelas plantas não depende, exclusivamente, da disponibilidade deles no solo, mas também de fatores como a cultura e o seu estágio fenológico. Nesse sentido, os efeitos positivos ou negativos da adição de materiais como os LETAs ao solo também podem depender da cultura considerada.

Mahdi et al. (2009) verificaram aumento do teor de P no tecido vegetal de plantas de milho ao combinar LETAs e biossólidos na proporção 1:1 até a dose de 3% (massa/massa), entretanto, na dose de 4% foi verificado diminuição da absorção de P e aumento da absorção de Al pelas plantas.

Os tratamentos somente com LETAs na sua composição não diferiram da testemunha em nenhuma das variáveis analisadas, evidenciando que esses materiais não diminuem a absorção de P e não aumentam os teores de Fe, Mn e Al no tecido foliar de azevém.

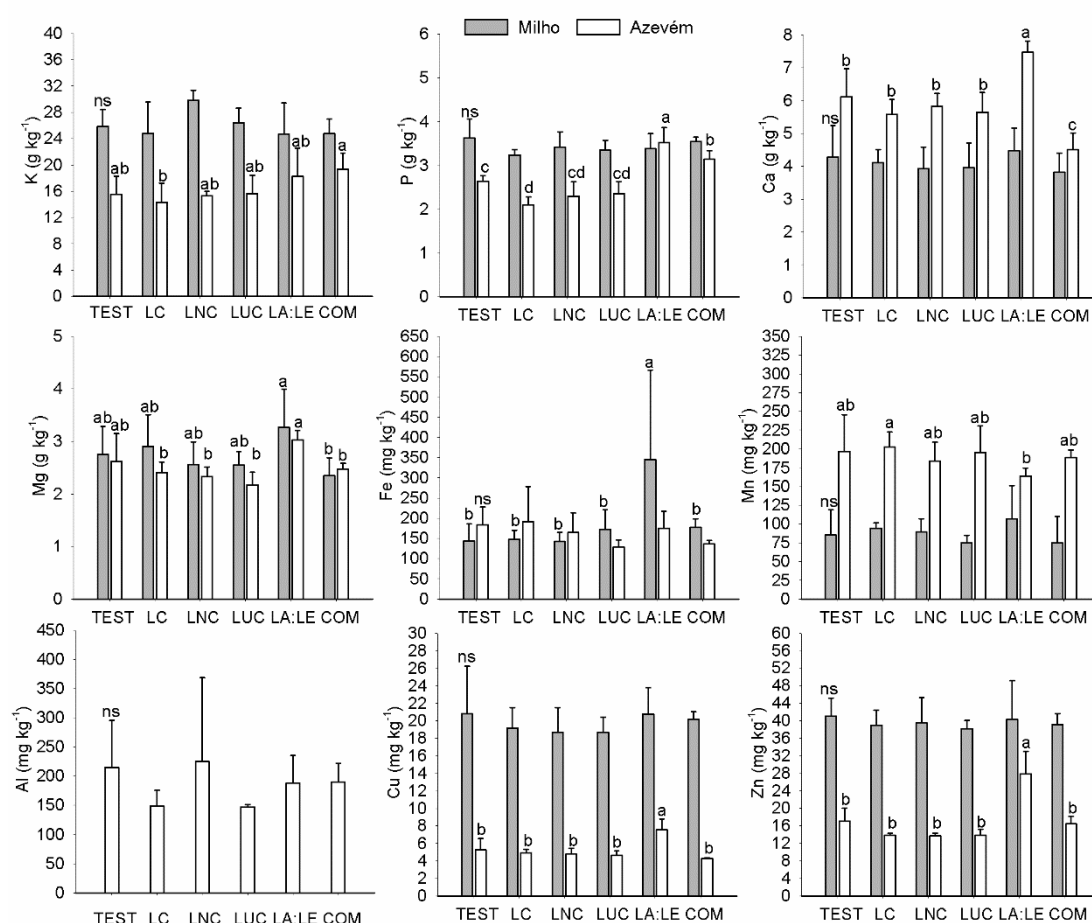


Figura 12 – Teores médios de Potássio (K), Fósforo (P), Cálcio (Ca), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Alumínio (Al), Cobre (Cu) e Zinco (Zn) no tecido foliar de plantas de milho e de azevém cultivadas em um Planossolo sob aplicação de dose de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras com cores iguais e seguidas por letras distintas indicam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan ($p < 0,05$).

Nenhum dos tratamentos testados resultou em aumento da concentração de metais pesados no tecido vegetal do azevém (Tabela 3). Considerando que a cultura do azevém é utilizada para fins de cobertura do solo e para pastagem, esses

resultados são importantes para reforçar que não há riscos de contaminação dos tecidos de plantas amplamente utilizadas na dieta de ruminantes.

Os LETAs não apresentam teores relevantes de metais pesados na grande maioria dos casos, evidenciando que esse tópico não implica restrições ao seu uso agrícola (ZHAO et al., 2018). Porém, existem alguns relatos de que LETAs podem promover a absorção de metais pesados como o Cr e o Cd (SHAHEEN et al., 2017).

Sendo assim, evidencia-se o fato de que os LETAs apresentam características variáveis em função das peculiaridades do seu local de origem e condições de formação, sendo, portanto, necessário caracterizar quimicamente lotes de LETAs para assegurar que contaminantes estejam abaixo dos limites máximos admitidos, antes da destinação em áreas agrícolas (ZHAO et al., 2018; MAHDI et al., 2009).

Tabela 3 - Bário (Ba), Cádmio (Ca), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Níquel (Ni) e Chumbo (Pb) no tecido foliar de plantas de azevém cultivadas em Planossolo sob aplicação de doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido e doses de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial).

Tratamentos	Ba	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
mg kg ⁻¹						
0	29,8	< 2,85	< 9,5	< 2,85	< 38,5	< 28,5
15	26,8	< 2,85	< 9,5	< 2,85	< 38,5	< 28,5
30	24,1	< 2,85	< 9,5	< 2,85	< 38,5	< 28,5
LNC	26,5	< 2,85	< 9,5	< 2,85	< 38,5	< 28,5
LUC	23,3	< 2,85	< 9,5	< 2,85	< 38,5	< 28,5
LA:LE	23,5	< 2,85	< 9,5	< 2,85	< 38,5	< 28,5
60	26,6	< 2,85	< 9,5	< 2,85	< 38,5	< 28,5
COM	22,5	< 2,85	< 9,5	< 2,85	< 38,5	< 28,5

5.4. Conclusões

As doses crescentes de LETA não têm efeito deletério sobre as variáveis agronômicas, enquanto que o tratamento LA:LE aumenta a altura e a massa seca das plantas cultivadas.

As doses crescentes de LETA não afetam os atributos relacionados a fertilidade do solo, não diminuindo o teor de fósforo disponível e não aumentando a porcentagem da CTC ocupada por Al.

As doses crescentes de LETA diminuem o teor de P e Zn no tecido vegetal, assim como aumentam o teor de Mn, fatores que têm o potencial de limitar o uso de doses iguais ou maiores do que 60 ton ha⁻¹.

A redução da umidade por solarização, a moagem e a correção do pH dos LETAs não influenciam o desempenho agrônômico de milho e azevém nas condições avaliadas nesse estudo.

O tratamento LA:LE aumenta os teores de P, Cu e Zn e, conseqüentemente, incrementa a concentração desses elementos no tecido vegetal.

As doses crescentes de LETAs até o máximo de 60 ton ha⁻¹, assim como a combinação de LETA com LETE, não interferem nos teores de metais pesados do solo e no tecido vegetal de plantas de azevém.

6. Capítulo 2 – Atributos físico-hídricos sob doses de Lodos de Estação de Tratamento de Água incorporados em um Planossolo

6.1. Introdução

Os lodos de estações de tratamento de água (LETAs) são resíduos sólidos gerados em quantidade significativa e de forma contínua, em função do tratamento de água para o consumo humano (KLEEMANN et al., 2020).

Esses resíduos são compostos por partículas minerais e orgânicas captadas nos processos de decantação e filtração durante o tratamento da água (BOTERO et al., 2009), com características semelhantes àsquelas dos solos da região onde a estação de tratamento está inserida.

Os LETAs podem conferir determinados benefícios aos atributos físicos de certos tipos de solo. Essas melhorias podem estar relacionadas à processos e funções do solo, como agregação, retenção e armazenamento de água e aeração do solo (ZHAO et al., 2018).

Isso acontece porque, além de ter matéria orgânica, os LETAs podem ser ricos em argilominerais, os quais auxiliam nos processos de agregação das partículas do solo, reconfigurando o sistema poroso de modo que afete também a capacidade de retenção e armazenamento de água.

Essas características são importantes, principalmente, em solos arenosos e com baixos teores de matéria orgânica. Esses solos têm baixa capacidade de disponibilizar água e nutrientes. Nesse sentido, os LETAs surgem como uma alternativa de aumentar a capacidade dos solos arenosos de armazenar e suprir água e nutrientes às plantas cultivadas.

A avaliação da qualidade física do solo vem sendo feita através de atributos físico-hídricos capazes de indicar a resistência do solo à degradação, mobilidade e disponibilização de água e ar às raízes de plantas (VAN LIER, 2014).

A densidade, a distribuição dos poros por tamanho, a resistência à penetração, a curva de retenção de água e a água disponível são indicadores usualmente utilizados para estudar os efeitos de práticas de manejo (REINERT et al., 2016; STÖKER et al., 2020) e aplicação de resíduos (ISLABAO et al., 2016; MARTINAZZO et al., 2019) no solo.

Todos os atributos indicados expressam, direta ou indiretamente, o volume e/ou função do espaço poroso do solo. Portanto, a porosidade é intimamente relacionada

com o conceito de qualidade física e, as condições adequadas para a produtividade agrícola e qualidade ambiental (REYNOLDS et al., 2009).

Acredita-se que a incorporação de LETAs em solos pode ser uma alternativa para a destinação desse resíduo. Entretanto, a grande maioria dos estudos avaliando o efeito da aplicação dos LETAs no solo considera apenas atributos químicos e a absorção de nutrientes pelas plantas (BUGBEE; FRINK, 1985; SILVEIRA, 2013), enquanto poucos pesquisadores consideraram os impactos que a incorporação desses resíduos pode ter na qualidade física (IBRAHIM et al., 2015).

Quando incorporados ao solo, os LETAs podem trazer benefícios, não afetar ou até mesmo causar prejuízos conforme o tipo de solo, de LETA e da dose aplicada. Em solos arenosos, é possível que os LETAs possam promover a agregação e o armazenamento de água em função das suas partículas mais finas compostas, principalmente, por argilominerais. Entretanto, em alguns casos, essas partículas mais finas podem ser prejudiciais ao obstruir poros e diminuir a condutividade hidráulica ou aumentar substancialmente a força de retenção da água pelo solo, indisponibilizando esse recurso (MOODLEY et al., 2004; MOODLEY; HUGHES, 2006). Desse modo, caso os LETAs proporcionem benefícios para determinados tipos de solos como os arenosos, acredita-se que possam ser uma matéria-prima para novos insumos, como os condicionadores.

Nesse contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar doses crescentes de LETAs e de diferentes estratégias de preparo e de combinação com LETEs em relação: i) aos teores de argila, silte, areia e à dispersão da argila no solo, ii) porosidade, densidade e resistência à penetração e iii) retenção e disponibilidade de água em um Planossolo cultivado com milho.

6.2. Materiais e Métodos

O estudo foi desenvolvido através da implantação e condução de experimento de campo, na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, coordenadas geográficas 31°49'9.70"S e 52°26'23.50"O. O solo dessa área é um Planossolo Háplico Eutrófico arênico (CUNHA et al., 2013)

Os tratamentos consistiram em doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹ de massa seca) de LETA solarizado moído e com pH corrigido, além de quatro tratamentos adicionais com: a) LETA solarizado moído sem correção do pH (30 ton ha⁻¹); b) LETA não solarizado com o pH corrigido (30 ton ha⁻¹); c) condicionador de

solo comercial (à base de casca de pinus bioestabilizada) MecPlant (30 ton ha⁻¹) e d) mistura de LETA solarizado e moído com pH corrigido, com lodo de estação de tratamento de esgoto solarizado e moído (30 ton ha⁻¹) na proporção de 75:25 de massa seca, respectivamente.

A solarização do LETA solarizado e do LETE foi realizada em estufa agrícola, em camadas de 0,1 m, até o teor de umidade inferior a 20%. O LETA não solarizado foi aplicado com teor de umidade de 50%. Posteriormente, os lodos foram moídos e peneirados, sendo utilizado o material com partículas inferiores a 2,0 mm. Os lodos foram obtidos de estações de tratamento da Companhia Rio-grandense de Saneamento (CORSAN).

Tabela 4 – Teor de argila, silte e areia de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE), e COM (condicionador de solo comercial).

	Argila ¹	Silte ¹	Areia ¹
	-----	(%) -----	
LC	16,50	3,78	79,72
LNC	17,42	6,16	76,42
LUC	14,49	8,25	77,25
LA:LE	17,76	7,54	74,70
COM ²	-	-	-

¹Determinados pelo método da pipeta (TEIXEIRA et al., 2017). ²Em função da natureza orgânica do material, a análise de distribuição de partículas por tamanho não foi realizada.

A área experimental, originalmente conduzida como campo nativo pastejado, foi preparada através de aração e gradagem, cerca de um mês antes da instalação do experimento. A calagem e a adubação seguiram as recomendações técnicas para a cultura (CQFS-RS/SC,2016).

O delineamento experimental empregado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, sendo cada unidade experimental formada por uma área de 25 m². O experimento foi implantado em 22/01/2019, quando os tratamentos foram dispostos manualmente sobre a superfície das parcelas e, posteriormente, incorporados com grade de discos movida com trator, na camada de 0,0 a 0,2 m. A cultura do milho foi semeada no dia 29/01/2019, visando uma população de 60.000 plantas ha⁻¹.

Foram coletadas amostras de solo com estrutura não preservada e preservada aos 90 dias da implantação do experimento, nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m.

As amostras com estrutura não preservada foram obtidas com o auxílio de pá de corte, passadas em peneira de 2 mm e utilizadas para determinar a distribuição

das partículas por tamanho nas classes de areia, silte e argila e para quantificar a argila dispersa em água pelo método da pipeta (TEIXEIRA et al., 2017).

As amostras com estrutura preservada foram obtidas através de cilindros metálicos com aproximadamente 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro para a determinação da densidade (D_s), porosidade total (P_t) e macroporosidade (M_a), microporosidade (M_i) conforme Teixeira et al. (2017); resistência à penetração (R_p), curva de retenção da água no solo (CRA), conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e água disponível às plantas (AD).

Após a saturação das amostras por capilaridade, foram equilibradas no potencial de -10 kPa em câmara de pressão de Richards (KLUTE, 1986) para a determinação da R_p com uso de um penetrômetro eletrônico de bancada (MA 933), dotado de sistema eletrônico de velocidade e de registro de dados (TORMENA et al., 2007).

Após a saturação por capilaridade, as amostras com estrutura preservada foram submetidas aos potenciais de -1 e -6 kPa, em mesa de tensão, e de -10 e -100 kPa, em câmaras de pressão de Richards com placa porosa (KLUTE, 1986), para a confecção da CRA, sendo que os conteúdos de água para potenciais menores do que -300 kPa foram obtidos em amostras com estrutura não preservada em um psicrômetro (WP4c, Decagon Devices).

Considerou-se a M_i como o conteúdo de água retido na amostra quando em equilíbrio a -6kPa, a P_t como o conteúdo de água retido na amostra quando em equilíbrio na condição de saturação do solo (0 kPa), enquanto que a M_a foi obtida por diferença entre P_t e M_i .

Os dados obtidos referentes a tensão de retenção *versus* conteúdo volumétrico de água no solo foram ajustados conforme o modelo de van Genuchten (1980) através do software Mathcad (MATHSOFT, 1998).

Após a determinação dos parâmetros empíricos da equação e dos dados ajustados, o θ_{CC} foi considerado como o conteúdo volumétrico de água retido no solo no potencial de -10 kPa enquanto o θ_{PMP} foi considerado como o conteúdo volumétrico de água retido no solo no potencial de -1.500 kPa. A AD foi calculada através da diferença entre θ_{CC} e θ_{PMP} .

Os resultados das variáveis foram submetidos a análise de normalidade de distribuição de frequência e verificação de valores discrepantes, procedendo-se a

análise da variância (teste F). As variáveis-resposta referentes às doses de LETA solarizado com pH corrigido, em que houve efeito significativo, foram submetidos à análise de regressão polinomial, enquanto que, as variáveis-resposta referentes aos tratamentos com dose única de 30 ton ha⁻¹, em que foi verificada diferença mínima significativa, o teste de Duncan ($p < 0,05$) foi aplicado, utilizando o software Winstat (MACHADO; CONCEIÇÃO, 2003).

6.3. Resultados e discussão

6.3.1. Atributos físico-hídricos do solo sob doses crescentes de LETAs com pH corrigido

A distribuição por tamanho das partículas minerais do solo em areia, silte e argila não é influenciada por práticas de manejo e, por isso, é considerada um atributo estável ao longo do tempo. Entretanto, a aplicação e incorporação de materiais, sobretudo, com predomínio de partículas minerais pode alterar essa distribuição de partículas por tamanho se a dose for suficientemente elevada.

As doses de LETA influenciaram positivamente o conteúdo de argila e silte e negativamente o teor de areia na camada de 0,0 a 0,1 m (Figura 13). Apesar de as variáveis terem sido afetadas, a variação do teor de argila, silte e areia, considerando a testemunha e a dose de 60 ton ha⁻¹, foi de apenas +1,55%; +1,59% e -3,15%, respectivamente, valores que não são suficientes para mudar a classificação do solo de acordo com o triângulo textural.

O aumento do teor argila em solos arenosos é benéfico, pois pode incrementar o armazenamento de água e nutrientes, fatores que são responsáveis pelas principais limitações desse tipo de solo para fins agrícolas. Além disso, a argila tem papel fundamental na proteção da MO e estabilização dela no solo e, sendo assim, o incremento de argila em solos arenosos pode beneficiar o acúmulo de MO em médio e longo prazo.

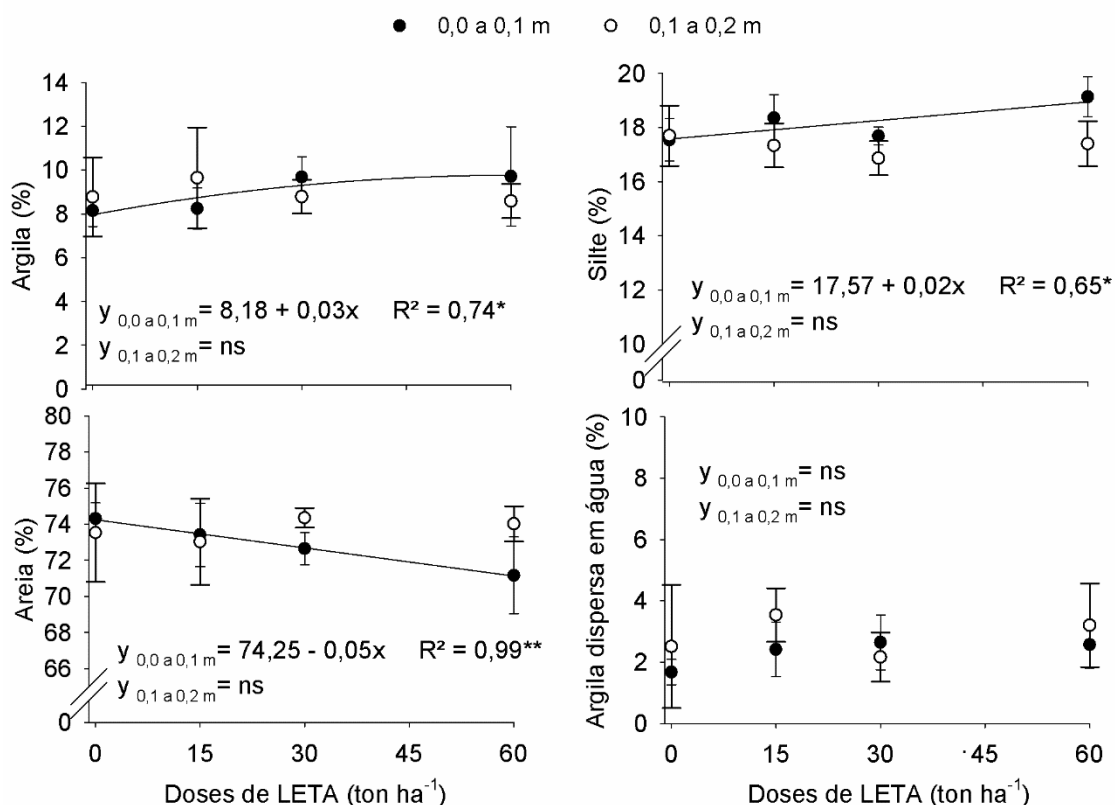


Figura 13 – Teores médios de argila, silte, areia e argila dispersa em água nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m de um Planossolo em resposta a doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha^{-1}) de LETAs com pH corrigido.

Sabendo que o Planossolo apresentou densidade média de $1,63 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 0,0 a 0,2 m, as doses de LETA acrescentadas correspondem a, aproximadamente, 0,5; 1 e 2% da massa total de solo. Sendo assim, o fato de elas causarem variações pequenas na distribuição de partículas é coerente com a proporção de material que foi aportado ao solo.

Além disso, o fato de os LETAs possuírem cerca de 16% de argila enquanto o solo tem 8%, provavelmente, é um dos responsáveis pelo incremento dessa variável com a elevação das doses. Entretanto, acredita-se que o teor de argila dos LETAs foi subestimado pela análise granulométrica em função da elevada força de ligação entre os óxidos de ferro e alumínio na fração argila e, após incorporados no solo sob a ação das raízes de plantas, exsudatos radiculares, atividade microbiana e alternância de ciclos de umedecimento e secagem, esses agregados tendem a se desfazer e a se reorganizar no processo de agregação do solo (STUMPF et al., 2016), resultando na elevação do teor de argila. Como nenhuma diferença entre a distribuição das partículas do solo foi encontrada na camada de 0,1 a 0,2 m, possivelmente, a

incorporação dos LETAs ocorreu de forma mais eficiente na camada de 0,0 a 0,1 do que na 0,1 a 0,2 m, fato que também contribuiu para a diferença verificada na camada mais superficial.

O LA:LE destacou-se por diminuir o teor de areia em relação a testemunha, na camada de 0,0 a 0,1 m (Tabela 5), e por aumentar o teor de silte e diminuir o de areia em comparação ao LC e LUC na camada de 0,1 a 0,2 m. Ademais, o LUC diminui o teor de argila dispersa em água em comparação ao LC na camada de 0,1 a 0,2 m.

Tabela 5 – Teores médios de argila, silte, areia e argila dispersa em água nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m de um Planossolo sob aplicação de dose de 30 ton ha⁻¹ de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Letras distintas indicam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan (p<0,05).

	Argila	Silte	Areia	AN
0,0 a 0,1 m				
TEST	8,15 ± 0,72 ^{ns}	17,54 ± 0,78 ^{ns}	74,32 ± 0,86 a	1,68 ± 0,41 ^{ns}
LC	9,68 ± 0,92	17,68 ± 0,33	72,64 ± 0,89 ab	2,64 ± 0,97
LNC	8,36 ± 2,84	18,94 ± 1,19	72,69 ± 1,65 ab	3,77 ± 2,62
LUC	9,18 ± 1,46	18,10 ± 1,96	72,72 ± 2,61 ab	3,41 ± 1,76
LA:LE	8,47 ± 0,79	19,61 ± 0,61	71,92 ± 1,18 b	4,05 ± 2,91
COM	8,46 ± 0,99	18,09 ± 1,84	73,45 ± 1,11 ab	3,31 ± 1,57
0,1 a 0,2 m				
TEST	8,77 ± 1,80 ^{ns}	17,70 ± 1,12 ab	73,53 ± 2,73 ab	2,51 ± 2,01 ab
LC	8,78 ± 0,77	16,86 ± 0,63 b	74,35 ± 0,53 a	2,16 ± 0,80 b
LNC	8,96 ± 0,28	17,66 ± 0,73 ab	73,38 ± 1,01 ab	3,83 ± 1,54 ab
LUC	9,56 ± 1,57	16,56 ± 1,40 b	73,87 ± 1,72 a	4,73 ± 2,27 a
LA:LE	9,54 ± 1,84	18,70 ± 0,87 a	71,76 ± 1,45 b	3,15 ± 2,06 ab
COM	9,02 ± 1,08	17,63 ± 0,61 ab	73,35 ± 1,50 ab	2,42 ± 1,24 ab

As doses de LETA com pH corrigido não apresentaram dependência com a Ds, Pt, Ma, Mi, Rp, AD, Θ_{CC} e Θ_{PMP} em ambas as camadas (Figura 14). Sendo assim, as doses testadas, apesar de causarem mudanças na distribuição de partículas, não interferiram nos atributos indicadores da qualidade física do solo.

Utilizando uma dose de LETA igual a 7,5 ton ha⁻¹ incorporada na camada de 0,0 a 0,1 m, Mukherjee et al. (2014) não identificaram mudanças nas variáveis Ds, Rp e AD logo após e 1,5 anos da aplicação do resíduo em um experimento de campo. Além disso, Ibrahim et al. (2015) ressaltam que seriam necessárias doses muito elevadas, em torno de 1.280 ton ha⁻¹ (MOODLEY et al., 2004; MOODLEY; HUGHES, 2006), de LETA para modificar as propriedades físicas intrínsecas do solo. Entretanto, esses autores utilizaram LETA com outro tipo de flocculante (PolyDADMAC) como

opção ao sulfato de alumínio, fato que, provavelmente, tornou possível a testagem de doses tão elevadas sem que restrições de ordem química fossem reportadas.

Por outro lado, a aplicação de LETAs em doses de, aproximadamente, 15 e 30 ton ha⁻¹ de LETAs foram capazes de aumentar os poros facilmente drenáveis (poros responsáveis pela retenção de água em potenciais ≥ -100 kPa), aumentar os poros com função de armazenar água (poros que retêm água entre -300 e 1.500 kPa) e diminuir os poros capilares (poros que retêm água em potenciais ≤ -1.500 kPa) (IBRAHIM et al., 2015). Esses resultados contrapõem os encontrados nesse estudo o qual não verificou efeito na Pt e na distribuição de poros do solo. A contradição entre os resultados, provavelmente, ocorreu em função da diferença entre os tipos de solos e composição dos LETAs dos dois estudos.

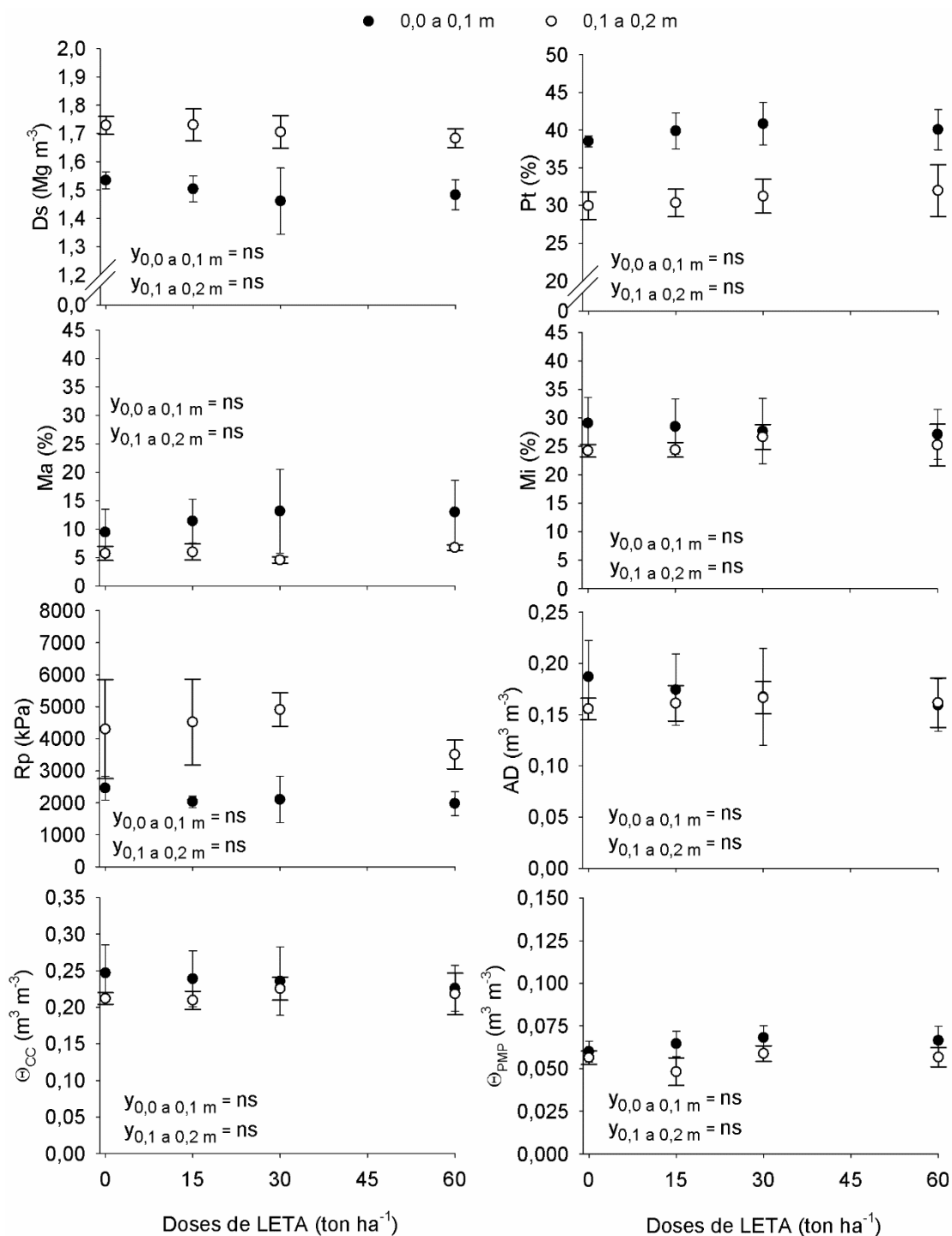


Figura 14 – Teores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência à penetração (Rp), água disponível às plantas (AD), umidade volumétrica na capacidade de campo (Θ_{CC}) e umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}) nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m em resposta a doses crescentes (0, 15, 30 e 60 ton ha⁻¹) de LETAs com pH corrigido em um Planossolo.

6.3.2. Atributos físico-hídricos do solo sob diferentes estratégias de preparo e de combinação dos LETAs com LETEs

O COM proporcionou os menores valores de Ds e os maiores de Pt nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m (Figura 15). Em função da natureza orgânica

desse condicionador de solo, possuindo uma densidade de $0,55 \text{ Mg m}^{-3}$, a sua mistura com o solo foi efetiva em reduzir a densidade na dose de 30 ton ha^{-1} . Com exceção do COM, todos os tratamentos resultaram em valores de D_s e P_t estatisticamente iguais.

A M_a não foi influenciada pelos tratamentos em ambas as camadas analisadas (Figura 15). Essa variável é responsável pela difusão de gases e drenagem, recomendando-se que seja maior ou igual a 10% do volume do solo para que esses processos aconteçam de forma que o desenvolvimento e crescimento das plantas não seja restringido (GRABLE; SIEMER, 1968; LI et al., 2020).

Todos os tratamentos proporcionaram M_a maior ou muito próxima a 10% na camada de 0,0 a 0,1 m, enquanto que, a 0,1 a 0,2 m, os valores menores, indicam que o solo possui drenagem e aeração deficientes em subsuperfície, independentemente dos tratamentos testados.

A M_i não foi alterada na camada de 0,0 a 0,1 m. Essa variável representa a capacidade de reter e armazenar umidade no solo, sendo importante para a disponibilidade de água às plantas. Nesse sentido, o COM melhorou a retenção de água no solo na camada de 0,1 a 0,2 m, pois ocasionou maior M_i .

A R_p é utilizada para indicar a resistência que as raízes das plantas encontram para penetrar no solo. Nesse sentido, considera-se que há alguma restrição ao desenvolvimento radicular em função da R_p quando o valor de 2.000 kPa é ultrapassado (TAYLOR et al., 1966; LI et al., 2020).

Os únicos tratamentos que proporcionaram valores de R_p menores do que 2.000 kPa foram o LA:LE e o COM na camada 0,0 a 0,1 m (Figura 15). Além disso, os valores de R_p na camada de 0,1 a 0,2 m foram mais de 100% superiores ao limite crítico, evidenciando limitações para a exploração de raízes em subsuperfície.

O Θ_{cc} é considerado o limite superior de disponibilidade de água às plantas (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1927; LI et al., 2020) e depende da estrutura do solo, ou seja, é a umidade que fica retida nos poros por capilaridade sob tensões menores. Portanto, assim como o verificado para a M_i , a Θ_{cc} foi aumentada pelo COM na camada 0,1 a 0,2 m enquanto os demais foram iguais entre si (Figura 15). A Θ_{cc} , na camada de 0,0 a 0,1 m, foi igual em todos tratamentos.

Quando a quantidade de água no solo decresce até níveis baixos, há fortes retenções que são determinadas, principalmente, pelo teor de argila. Nesse sentido, a Θ_{pmp} descreve a retenção de água sob altas tensões e indica o limite inferior de

disponibilidade de água (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1927; LI et al., 2020), pois as plantas, em geral, não conseguem absorver água em tensões maiores do que essa. A Θ_{PMP} não foi alterada por nenhum tratamento (Figura 15), provavelmente, em razão de nenhum deles ter modificado o teor de argila no solo.

A AD, calculada pela diferença entre Θ_{CC} e Θ_{PMP} (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1927; LI et al., 2020), não foi afetada pelos tratamentos na camada 0,0 a 0,1 m. Por outro lado, o COM acarretou os maiores valores na camada 0,1 a 0,2 m, provavelmente devido à elevação da M_i e, conseqüente aumento da Θ_{CC} gerado por esse tratamento na camada subsuperficial.

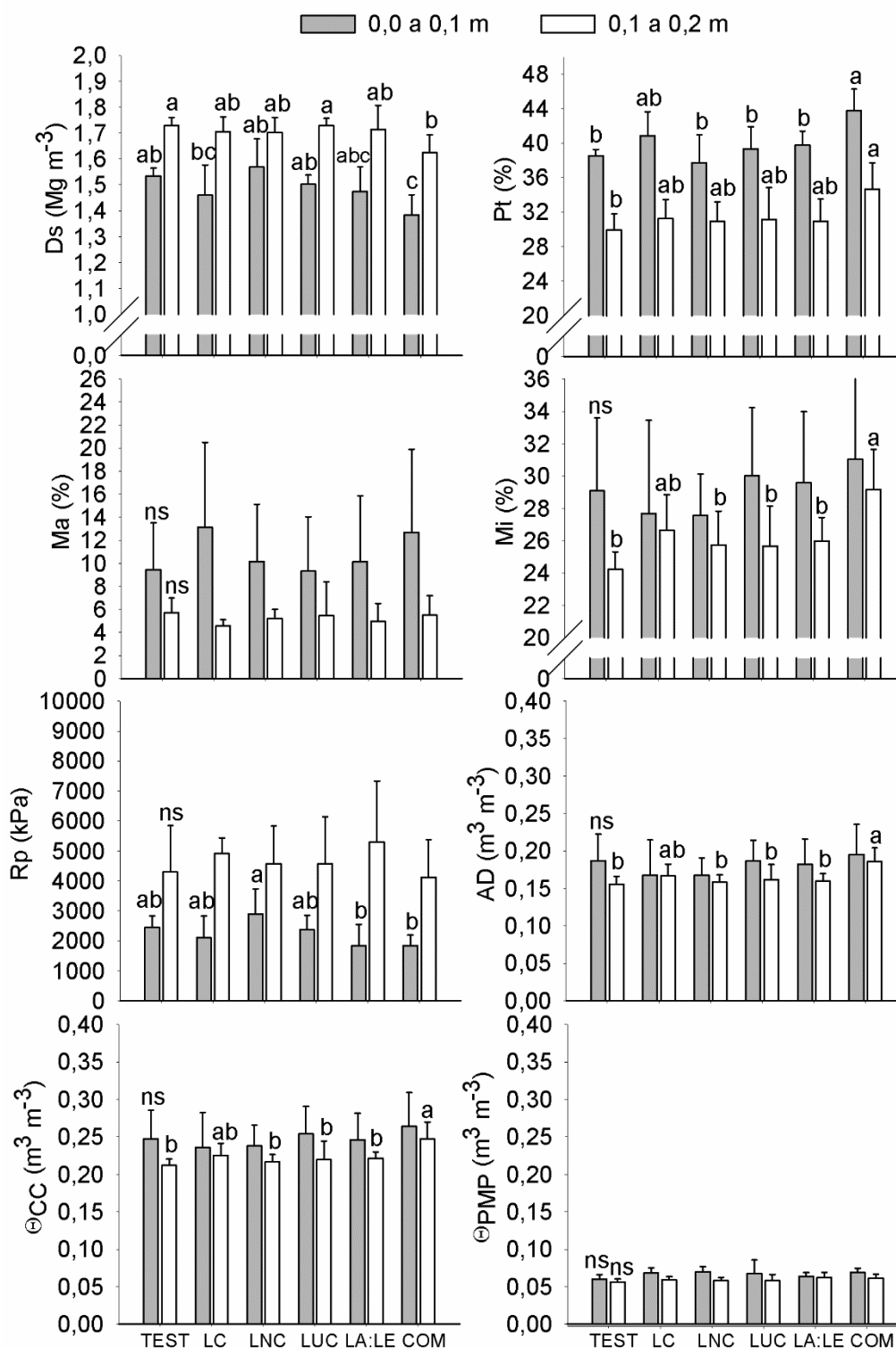


Figura 15 – Valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência à penetração (Rp), água disponível às plantas (AD), umidade volumétrica na capacidade de campo (Θ_{CC}) e umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}) nas camadas de 0,0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m de um Planossolo sob aplicação de dose de 30 ton ha^{-1} de LC (LETA corrigido), LNC (LETA não corrigido), LUC (LETA úmido corrigido), LA:LE (mistura de 75% de LETA com 25% de LETE) e COM (condicionador de solo comercial). TEST: Testemunha (sem aplicação de materiais ao solo). Barras com cores iguais e seguidas por letras distintas indicam médias diferentes de acordo com o teste de Duncan ($p < 0,05$).

Quando se analisa o efeito da incorporação de materiais com propriedades físicas e composições distintas, a análise deve considerar as peculiaridades e origens de cada material.

O LC, LNC e LUC são tratamentos que, apesar de terem passado por preparações distintas, originam-se do mesmo material de origem (LETA), o que explica o fato de possuírem densidades semelhantes. Já o LA:LE tem 25% do seu peso composto por LETE, material que tem densidade menor do que o LETA, resulta em diminuição da densidade. Já o COM é um produto com características físicas bastante diferentes, pois é um material essencialmente orgânico, à base de casca de pinus bioestabilizada, com baixa densidade e que por tanto, apesar de ter sido aplicado na mesma dose (base de massa) em relação aos demais tratamentos, foi aplicado em um volume maior.

Sendo assim, apesar de todos esses tratamentos terem sido balizados pela dose de 30 ton ha^{-1} , a qual equivale a pouco menos de 1% da massa total de solo, a dose do COM, quando se considera seu volume em relação ao do solo, é mais elevada que a dos demais tratamentos, explicando porque esse tratamento se destacou por aumentar a M_i , Θ_{cc} e a AD.

6.4. Conclusões

As doses crescentes de LETA afetam a distribuição de partículas do solo arenoso avaliado no estudo, aumentando o teor de argila e silte enquanto o conteúdo de areia decresce.

As variáveis densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, resistência do solo à penetração, água disponível às plantas, conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente não são influenciadas pelas doses crescentes de LETAs testadas.

Os LETAs com pH corrigido, sem correção do pH e o LETA não solarizado e não moído, assim como a mistura LA:LE, não modificam as variáveis físicas do solo analisadas quando aplicados na dose de 30 ton ha^{-1} .

O condicionador de solo comercial aumenta a microporosidade, o conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo e a água disponível do Planossolo.

7. Considerações finais

O ajuste do pH do solo, do LETA e da dose adequada do LETA torna possível a utilização agrícola desse resíduo, de forma segura e sustentável. Esse resultado é promissor pois o LETA é um dos maiores passivos das empresas de saneamento e tratamento de água em todo o mundo e o setor agrícola representa uma excelente alternativa de disposição final ambientalmente e economicamente sustentável desse resíduo para muitos países com áreas agrícolas disponíveis como o Brasil.

Entretanto, alguns requisitos precisam ser atendidos para que esses materiais possam ser aplicados em solos agrícolas. Esses requisitos incluem o monitoramento periódico das características dos LETAs durante sua originação na estação de tratamento, a manutenção do pH do solo em torno de 6,5 e a utilização de doses recomendadas que, conforme os resultados desse estudo, foram de 30 ton ha⁻¹.

Para promover isso, recomenda-se a elaboração de legislação específica pelos órgãos responsáveis, assim como já existe para outros resíduos como os lodos de estação de tratamento de esgoto.

A existência de legislação específica habilita a utilização agrícola dos LETAs como forma sustentável e eficiente de reciclagem, pois padronizaria o processo de aplicação e assegura o alcance dos resultados esperados, ou seja, restringe possíveis efeitos deletérios no ecossistema e nas culturas. Todos os trabalhos e resultados que indicam algum prejuízo ocasionado por LETAs em áreas agrícolas não consideram os requisitos listados aqui para a utilização desses materiais.

Ademais, a combinação dos LETAs com resíduos orgânicos como os LETEs tem potencial de uso e de registro como condicionador de solo e, consequentemente, geração de valor para as empresas que efetuam o saneamento básico ou que prestam serviços de disposição final de resíduos sólidos dessas empresas. Desse modo, solos arenosos, pobres e deficientes passariam a ser beneficiados pelo aporte dos resíduos.

Para o futuro, ainda são necessários estudos que monitorem os efeitos da aplicação de LETAs a longo prazo, assim como a reaplicação desses materiais.

Referências

ALQAM, M.; JAMRAH, A.; DAGHLAS, H. Utilization of cement incorporated with water treatment sludge. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 5, n. 2, p. 268-277, 2011.

ALTHAUS, D.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; SILVA, K.J.D.; BISSANI, C.A.; Felisberto, R. Natural fertility and metals contents in soils of Rio Grande do Sul (Brazil). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.42, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-10.004**: Resíduos Sólidos- Classificação, 2004. Rio de Janeiro, ABNT.

BABATUNDE, A.O.; ZHAO, Y.Q.; YANG, Y.; KEARNEY, P. Reuse of dewatered aluminium-coagulated water treatment residual to immobilize phosphorus: Batch and column trials using a condensed phosphate. **Chemical Engineering Journal**, v.136, n.2-3, p.108-115, 2008.

BABATUNDE, A.O.; ZHAO, Y.Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v.37, n.2, p.129-164, 2007.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B.M.; AISSE, M.M.; MARIN, L.M.K.D.S.; SIMÃO, C.C. Application of sludges from water treatment plant and from sewage treatment plant in degraded soil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v.17, n.3, p.315-324, 2012.

BOTERO, W. G.; SANTOS, A. dos; OLIVEIRA, L. C. de, ROCHA, J. C. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2018-2022, 2009.

BUGBEE, G.J.; FRINK, C.R. Alum sludge as a soil amendment: Effects on soil properties and plant growth, 1985.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO – CORSAN. Tratamento de água. Disponível em <www.corsan.com.br/tratamentodeagua>. Acesso em: 17 ago. 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução n.º 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, 30 ago. 2006. Seção 1, p.141-146.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução Nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, DF: Diário Oficial [da] União Nº 249, dezembro 2009, p 81-84.

CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11.ed. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2016. 401 p.

CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

CUNHA, N.G. da; COSTA, F.A. da. **Solos da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. 6p. (Embrapa Clima Temperado. Circular técnica, 152).

DASSANAYAKE, K.B.; JAYASINGHE, G.Y.; SURAPANENI, A.; HETHERINGTON, C. A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. **Waste Management**, v.38, p.321-335, 2015.

ELLIOTT, H.A.; O'CONNOR, G.A.; LU, P.; BRINTON, S. Influence of water treatment residuals on phosphorus solubility and leaching. **Journal of Environmental Quality**, v.31, n.4, p.1362-1369, 2002.

EVUTI, A.M.; Lawal, M. Recovery of coagulants from water works sludge: A review. **Advances in Applied Science Research**, v.2, n.6, p.410-417, 2011.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER – FEPAM. **Portaria N.º 85/2014**. Dispõe sobre o estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade (VRQ) dos solos para 09 (nove) elementos químicos.

GOOGLE EARTH-MAPAS. <https://www.google.com/earth/>. Consulta realizada em 28/07/2020.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** v.32, p.180-186, 1968.

HEIL, D. M.; BARBARICK, K. A. Water treatment sludge influence on the growth of sorghum-sudan grass. **Journal of environmental Quality**. v.18, n.3, p. 292-298, 1989.

IBRAHIM, M. M.; MAHMOUD, E. K.; IBRAHIM, D. A. Effects of vermicompost and water treatment residuals on soil physical properties and wheat yield. **International Agrophysics**, v.29, n.2, p. 157-164, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA, ESTATÍSTICA. Departamento de População, Indicadores Sociais. **Pesquisa nacional de saneamento básico**: 2008. IBGE; 2010.

IPPOLITO, J. A.; BARBARICK, K. A.; ELLIOTT, H. A. Drinking water treatment residuals: a review of recent uses. **Journal of environmental quality**, v. 40, n. 1, p. 1-12, 2011.

IPPOLITO, J.A.; BARBARICK, K.A.; STROMBERGER, M.E.; PASCHKE, M.W.; BROBST, R.B. Water Treatment Residuals and Biosolids Long-Term Co-Applications Effects to Semi-Arid Grassland Soils and Vegetation. **Soil Science Society of America Journal**, v.73, n.6, p.1880-1889, 2009.

ISLABÃO, G. O.; LIMA, C. L.; VAHL, L.C.; TIMM, L.C.; TEIXEIRA, J. B. Hydro-Physical Properties of a Typic Hapludult under the Effect of Rice Husk Ash. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, 2016.

KIM, J. G.; LEE, S. S.; MOON, H. S.; KANG, I. M. Land application of alum sludge from water purification plant to acid mineral soil treated with acidic water. **Soil science and plant nutrition**, v.48, n.1, p. 15-22. 2002.

KLEEMANN, N.; TORRES, D.P.; RIBEIRO, A.S.; BAMBERG, A.L. Cold finger with semi closed reflux system for sample preparation aiming at Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, V and Zn determination in Drinking Water Treatment Sludge by MIP OES. **Analytica Chimica Acta**, v. 1096, p.9-17, 2020.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 1: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-660.

LI, S.; WU, X.; LIANG, G.; GAO, L.; WANG, B.; Lu, J.; ABDELRHMAN, A.A.; SONG, X.; ZHANG, M.; ZHENG, F.; DEGRÉ, A. Is least limiting water range a useful indicator of the impact of tillage management on maize yield?. **Soil and Tillage Research**, v.199, p.104602, 2020.

LOMBI, E.; STEVENS, D.P.; MCLAUGHLIN, M.J. Effect of water treatment residuals on soil phosphorus, copper and aluminium availability and toxicity. **Environmental Pollution**. v.158, p. 2110–2116, 2010.

MACHADO, A.A.; CONCEIÇÃO, A.R. **Sistema de análise estatística para Windows** – Winstat. Versão 2.0. Pelotas: UFPel, 2003. 42p.

MAHDY, A.M.; ELKHATIB, E.A.; FATHI, N.O.; LIN, Z.Q. Effects of Co-Application of Biosolids and Water Treatment Residuals on Corn Growth and Bioavailable Phosphorus and Aluminum in Alkaline Soils in Egypt. **Journal of environmental quality**, v.38, n.4, p.1501-1510, 2009.

MAIDEN, P.; HEARN, M.T.W.; BOYSEN, R.I.; CHIER, P.; WARNECKE, M.; JACKSON, W.R. **Alum sludge re-use, Investigation (100S-42) prepared by GHD and Centre for Green Chemistry (Monash University) for the Smart Water Fund**, Victoria, ACTEW Water & Seawater. Melbourne, Australia, 2015.

MARTINAZZO, R.; SILVEIRA, C.A.P.; BAMBERG, A.L.; STUMPF, L.; STOCKER, C.M.; MONTEIRO, A.B.; dos SANTOS PEREIRA, I.; RIBEIRO, P.L.; GIACOMINI,

S.J. Incorporation of retorted oil shale in Brazilian agricultural soil: An assessment of impacts after successive applications. **Journal of Cleaner Production**, p.118652, 2019.

MATHSOFT, 1998. Mathcad 8 Professional Academic. (Mathsoft Inc.: Cambridge MA). Acessado em 10 maio 2014. Online. Disponível em: <http://www.mathsoft.com>.
MCKEAGUE, J.A.; BRYDON, J.E.; MILES, N.M. Differentiation of forms of extractable iron and aluminum in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.35, n.1, p.33-38, 1971.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Instrução Normativa nº 28 de 27/07/2007**. Aprova os Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes Minerais, Orgânicos, Organo-Minerais e Corretivos. Brasília, DF: Diário Oficial [da] União, julho 2007.

MOODLEY, M.; JOHNSTON, M.A.; HUGHES, J.C.; TITSHALL, L.W. Effects of a water treatment residue, lime, gypsum, and polyacrylamide on the water retention and hydraulic conductivity of two contrasting soils under field conditions in KwaZulu-Natal, South Africa. **Soil Research**, v.42, n.3, p.273-282, 2004.

MOODLEY, M.; HUGHES, J.C., The effects of a polyacrylamide-derived water treatment residue on the hydraulic conductivity, water retention and evaporation of four contrasting South African soils and implications for land disposal. **Water science and technology**, v54, n.5, p.227-234, 2006.

MUKHERJEE, A.; LAL, R.; ZIMMERMAN, A.R. Impacts of 1.5-year field aging on biochar, humic acid, and water treatment residual amended soil. **Soil science**, v.179, n.7, p.333-339, 2014.

OLADEJI, O.O., SARTAIN, J.B.; O'CONNOR, G.A. Land application of aluminum water treatment residual: Aluminum phytoavailability and forage yield. **Communications in soil science and plant analysis**, v.40, n.9-10, p.1483-1498, 2009.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS BRASIL – ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em: 01 set. 2020.

PASTOR, A.V.; PALAZZO, A.; HAVLIK, P.; BIEMANS, H.; WADA, Y.; OBERSTEINER, M.; KABAT, P.; LUDWIG, F. The global nexus of food–trade–water sustaining environmental flows by 2050. **Nature Sustainability**, v.2, n.6, p.499, 2019.

PENN, C.J.; CAMBERATO, J.J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. **Agriculture**, v.9, n.6, p.120, 2019.

PEREIRA, I. dos S.; BAMBERG, A.L.; de SOUSA, R.O.; MONTEIRO, A.B.; MARTINAZZO, R.; SILVEIRA, C.A.P.; SILVEIRA, A. de O. Agricultural use and pH correction of anaerobic sewage sludge with acid pH. **Journal of Environmental Management**, v.275, p.111203, 2020.

PETTERLE, A.R.; SANTIAGO, G.G.; CHONG, W.; SOMENSI, L.; TAMBORIM, S.M. Ceramic plates containing sludge from a water treatment plant and the rice husk ash: Relation between physical-chemistry properties and microstructure. **Química Nova**, v.41, n.10, p.1117-1126, 2018.

RAMALHO, Raquel Pinheiro Reis Souza. **Avaliação do uso de resíduo de estação de tratamento de água na produção de espécies vegetais com ocorrência no cerrado**. 2015. 96 f. Dissertação (Engenharia do Meio Ambiente), Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/5419/5/Dissertação%20-%20Raquel%20Pinheiro%20Reis%20Souza%20Ramalho%20-%202015.pdf>> Acesso 16 ago. 2018.

REINERT, D.J.; SATTler, A.; DENARDIN, J.E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; Fox, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3-4, p. 252-263, 2009.

RUSSELL, G.A. From lagooning to farmland application: The next step in lime sludge disposal. **Journal-American Water Works Association**, v.67, n.10, p.585-588, 1975.

SCALIZE, P.; NETO, A.; ALBUQUERQUE, A. Water treatment sludge as potential soil amendment for native plants of the brazilian cerrado. **Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)**, v.17, n.5, 2018.

SHAHEEN, S.M.; SHAMS, M.S.; KHALIFA, M.R.; MOHAMED, A.; RINKLEBE, J. Various soil amendments and environmental wastes affect the (im) mobilization and phytoavailability of potentially toxic elements in a sewage effluent irrigated sandy soil. **Ecotoxicology and environmental safety**, v.142, p.375-387, 2017.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant physiology**, v.156, n.3, p.997-1005, 2011.

SILVEIRA, M.L.; DRISCOLL, J.L.; SILVEIRA, C.P.; GRAETZ, D.A., SOLLENBERGER, L.E.; VENDRAMINI, J. Land application of aluminum water treatment residual to Bahiagrass pastures: soil and forage responses. **Agronomy Journal**, v.105, n.3, p.796-802, 2013.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – SNIS**, 2018. Acessado em 11 agosto 2020. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2018>.

STÖCKER, C.M.; BAMBERG, A.L.; STUMPF, L.; MONTEIRO, A.B.; CARDOSO, J.H.; de LIMA, A.C.R. Short-term soil physical quality improvements promoted by an agroforestry system. **Agroforestry Systems**, p.1-12, 2020.

STUMPF, L.; PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S. Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. **Soil and Tillage Research**, v.161, p.71-78, 2016.

SUDA, A.; BABA, K.; AKAHANE, I.; MAKINO, T. Use of water-treatment residue containing polysilicate-iron to stabilize arsenic in flooded soils and attenuate arsenic uptake by rice (*Oryza sativa* L.) plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.62, n.2, p.111-116, 2016.

TAY, D. Y. Y.; FUJINUMA, R.; WENDLING, L. A. Drinking water treatment residual use in urban soils: Balancing metal immobilization and phosphorus availability. **Geoderma**, v. 305, p. 113-121, 2017.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr, J.J. Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. **Soil science**, v.102, n.1, p.18-22, 1966.

TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G., 2017. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Embrapa. 573p.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M.D. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.2, p.211-219. 2007.

TURNER, T.; WHEELER, R.; STONE, A.; OLIVER, I. Potential Alternative Reuse Pathways for Water Treatment Residuals: Remaining Barriers and Questions: a Review. **Water, Air, & Soil Pollution**, v.230, n.9, p.227, 2019.

van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

van LIER, J. Revisiting the S-index for soil physical quality and its use in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 1-10, 2014.

VIEHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiol.** v.2, p.71-78, 1927.

WANG, F.; COUILLARD, D.; AUCLAIR, J.C.; CAMPBELL, P.G.C. Effects of alum treated waste water sludge on barley growth, **Water. Air Soil Pollut.** v.108, p. 33–49, 1998.

WASSERMAN, J.C.; de OLIVEIRA SILVA, L.; de PONTES, G.C.; PAIVA LIMA, E. Mercury contamination in the sludge of drinking water treatment plants dumping into a reservoir in Rio de Janeiro, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v.25, n.28, p.28713-28724, 2018.

YANG, G.H.; ZHU, G.Y.; LI, H.L.; HAN, X.M.; LI, J.M. Accumulation and bioavailability of heavy metals in a soil-wheat/maize system with long-term sewage sludge amendments. **Journal of Integrative Agriculture**, v.17, n.8, p.1861-1870, 2018.

ZHAO, Y.; LIU, R.; AWE, O. W., YANG, Y.; SHEN, C. Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals—an explicit and comprehensive review. **Chemical Engineering Journal**. v.353, p.717-726, 2018.

Anexos

Anexo A – Área experimental antes da implantação do experimento.



Anexo B – Aplicação dos tratamentos nas unidades experimentais, condicionador de solo comercial na superfície da parcela e lodo de estação de tratamento de água na superfície da parcela.



Anexo C – Incorporação dos tratamentos



Anexo D – Semeadura do milho.

Anexo E – Perfil do solo na camada de 0,0 a 0,4 m, coleta de amostras com estrutura não preservada e coleta de amostras com estrutura preservada.



Anexo F – Medição da altura, do diâmetro de colmo e do índice de clorofila de plantas de milho.



Anexo G – Cultivo de azevém no momento da aplicação de ureia em cobertura e da coleta de amostras para determinação da massa seca.

